



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TIINA RUUSKA

LAASTIN JA BETONIN LÄMMÖNJOHTAVUUDEN JA OMINAIS-  
LÄMPÖKAPASITEETIN MÄÄRITTÄMINEN LÄMPÖVIRTALEVY-  
LAITTEELLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tuotantotalouden ja rakentamisen  
tiedekunnan tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 8. marraskuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**RUUSKA, TIINA:** Laastin ja betonin lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin määrittäminen lämpövirtalevylaitteella

Diplomityö, 70 sivua, 24 liitesivua

Marraskuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, lämpövirtalevylaitte, laasti, betoni, FOX50, FOX304, rakennusfysiikka

Lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti kuuluvat tärkeimpiin rakennusfysiikaalisiin materiaaliominaisuuksiin. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kyseiset ominaisuudet tutkittavaksi toimitetuilta 18 laastilta. Tämän lisäksi tarkasteltiin korkeammille lämmönjohtavuuksille tarkoitetun lämpövirtalevylaitteen soveltuvuutta betonin lämmönjohtavuus- ja ominaislämpökapasiteettimittauksiin sekä korkeammille ja alemmille lämmönjohtavuuksille tarkoitettujen laitteiden välisiä eroja. Työ on suoritettu Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen tiloissa ja laitteilla.

Työ jakautuu kahteen osaan. Kirjallisuusosassa esitellään oleellimmat lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin yhtälöt sekä tutustutaan lämpövirtalevylaitteen toimintaan. Tutkimusosuudessa tarkastellaan laitteen antamia tuloksia ja laitteen soveltuvuutta tehtyihin mittauksiin.

Laastimittauksissa saatujen lämmönjohtavuuksien keskihajonta oli pieni ja tulokset mielekkäitä, minkä perusteella lämpövirtalevylaitteen toiminta laastien lämmönjohtavuusmittauksissa todettiin hyväksi. Tulokset kuitenkin osoittivat, että kirjallisuudessa laasteille annettu lämmönjohtavuuden arvo ei ole riittävä kuvaamaan laastien laajaa aluetta. Laitte soveltuu myös betonin lämmönjohtavuuden mittaamiseen tietyin ehdoin. Betonimittaukset osoittivat, että epähomogeenisen materiaalin mittauksissa koekappaleita on oltava riittävästi ja monipuolisesti. Sopimattomien koekappaleiden esikarsimiseksi ei löydetty ulkonäköön tai massa perustuvaa keinoa.

Lämmönjohtavuusmittauksissa käytetyllä mittausmenetelmällä on merkittävä vaikutus lopputulokseen, minkä vuoksi menetelmän valintaan on panostettava. Kaikissa mittauksissa oleellista on minimoida ilmarakojen määrä ja saada mitatuksi tutkittavan kappaleen pinnan todellinen lämpötila.

Ominaislämpökapasiteettimittausten suorittaminen lämpövirtalevylaitteella oli lämmönjohtavuusmittauksia vaikeampaa, mutta muuttamalla asetuksia myös niistä saatiin mielekkäitä tuloksia. Laitteen tarkkuus ominaislämpökapasiteettimittauksissa on laitevalmistajan mukaan viisi prosenttia, mikä saattaa tietyissä tilanteissa olla liian epätarkka.

Kaikissa edellä mainituissa mittauksissa oli käytetty korkeammille lämmönjohtavuusarvoille tarkoitettua lämpövirtalevylaitetta. Lisätutkimuksissa suoritettujen mittaus-ten perusteella toinen käytössä ollut, lämmöneristeille tarkoitettu lämpövirtalevylaitte ei sovellu oman mittausalueensa ylittäviin mittauksiin.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**RUUSKA, TIINA:** The measurement of thermal conductivity and specific heat capacity for plasters and concrete with a Heat Flow Meter

Master of Science Thesis, 70 pages, 24 appendix pages

November 2014

Major: Civil engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: thermal conductivity, specific heat capacity, heat flow meter, plaster, concrete, FOX50, FOX304, building physics

Thermal conductivity and specific heat capacity are some of the most important material characteristics in building physics. The aim of this thesis was to define the above-mentioned characteristics for 18 plasters which were examined. Furthermore, the suitability of higher thermal conductivity apparatus in measuring the thermal conductivity and the specific heat of different types of concrete is tested, and the differences between the said apparatus and an apparatus for lower thermal conductivity were explored. All work has been done at the Department of Structural Engineering in Tampere University of Technology (TUT) and with their equipment.

This thesis is divided into two parts. The most important equations in thermal conductivity and specific heat capacity are presented and the operations of Heat Flow Meter (HFM) are made known in the literature study part. In the second part, both the results of measurements and the suitability of the apparatus are analysed.

In thermal conductivity measurements the HFM worked well; this can be said due to the small standard deviation of measured values and because overall the results were reasonable. However, the study indicates that the value given in the literature is not sufficient to illustrate the wide variety of plasters. In addition to measuring plasters, the apparatus can define the thermal conductivity values of concrete, given that some conditions are met. The concrete measurements indicate that when measuring inhomogeneous materials, there must be enough specimens and that the specimens must be versatile. A way to screen out unsuitable specimens in advance based on look or mass was not found.

The measuring method in thermal conductivity measurements has a significant effect to the result, which is why the method must be chosen with care. Minimising the number of air gaps and measuring the true temperature of the specimen's surface are absolutely necessary when measuring any value with HFM.

Using HFM to define the specific heat capacity is slightly more complex than using it to measure thermal conductivity but acceptable results can be acquired by changing the settings. According to the manufacturer the accuracy of HFM in specific heat capacity measurements is five percent which could be too imprecise in some situations.

In all the above-mentioned measurements the higher thermal conductivity apparatus was used. The other HFM is normally used with thermal insulation materials and, like the additional tests that were done imply, is not suitable to be used in measurements above its effective range.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on osa Kiilto Oy:n Ffiller-projektia. Työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella opinnäytetyöksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Kiitän työnantajaani sekä työni ohjaajaa Juha Vinhaa mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitos Kiilto Oy:n porukalle ja LaserCompille. Kiitos asioiden selventämisestä Petteri Huttuselle ja Marko Kiilille. Erityiskiitos Mikolle, joka huolehti tärkeimmistäni työpäivieni aikana, sekä pojille, jotka ovat joka päivä uskollisesti odottaneet minua kotiin.

Tampereella 12.11.2014

---

Tiina Ruuska



# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
1.1	Työn taustaa .....	1
1.2	Työn rakenne.....	2
1.3	Työn suoritus ja rajaukset .....	2
2	Lämpö .....	3
2.1	Yleistä .....	3
2.2	Lämmön sitoutuminen .....	4
2.2.1	Teoriaa .....	4
2.2.2	Ominaislämpökapasiteetti.....	6
2.3	Lämmön siirtyminen .....	7
2.3.1	Teoriaa .....	7
2.3.2	Johtuminen yksiulotteisessa tapauksessa.....	7
2.3.3	Konvektio .....	9
2.3.4	Säteily .....	10
3	Lämpövirtalevyalaite .....	11
3.1	Laitteen toimintaperiaate.....	11
3.2	Koekappaleen ja lämpövirtalevyn kontakti.....	13
3.2.1	Kontakti .....	13
3.2.2	Kontaktin parantaminen.....	13
3.3	Mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä.....	14
3.3.1	Materiaalin tiheys .....	14
3.3.2	Mittauslämpötila .....	15
3.3.3	Koekappaleen kosteus .....	15
3.4	Mittauksissa käytettävä laite: FOX50 .....	15
3.4.1	Laitteen esittely.....	15
3.4.2	Koekappaleen koko .....	16
3.4.3	Mittausalue ja -tarkkuus .....	17
3.4.4	Kalibrointi.....	17
3.4.5	Termolankojen käytön vaikutus laskelmiin.....	18
3.4.6	Kumilevyjen käytön vaikutus laskelmiin .....	19
3.4.7	Two-thickness method.....	21
3.5	Vertailulaite: FOX304.....	23
3.5.1	Laitteen esittely.....	23
3.5.2	Termolankojen käytön vaikutus laskelmiin.....	24
3.5.3	Kumilevyjen käytön vaikutus laskelmiin .....	24
3.6	Ominaislämpökapasiteetti FOX50-laitteella.....	24
4	Laastien lämmönjohtavuusmittaukset.....	27
4.1	Laastikoekappaleiden valmistus ja säilytys .....	27
4.2	Mittausmenetelmän valinta .....	29
4.2.1	Mittausmenetelmävaihtoehdot ja mittausolot.....	29

4.2.2	Mittausmenetelmän valintakokeet .....	30
4.2.3	Valittu mittausmenetelmä .....	33
4.3	Varsinaisten mittausten tulokset .....	33
4.4	Tulosten tarkastelu .....	35
4.4.1	Mittausolot .....	35
4.4.2	Tutkitut tuotteet .....	35
4.4.3	Laastien lämmönjohtavuudet kirjallisuudessa .....	37
4.4.4	Lämmönjohtavuuden ja tiheyden välinen yhteys .....	37
4.4.5	Paksujen ja ohuiden koekappaleiden erot .....	38
4.5	Faasimuutosmateriaali 10–50 °C lämpötiloissa .....	39
5	Laastien ominaislämpökapasiteettimittaukset .....	42
5.1	Mittausjärjestelyt .....	42
5.2	Mittaustulokset .....	42
5.3	Tulosten tarkastelu .....	43
5.3.1	Tutkitut tuotteet .....	43
5.3.2	Laastien ominaislämpökapasiteetit kirjallisuudessa .....	45
5.3.3	Mittauslämpötilan vaikutus mittausarvoihin .....	45
5.3.4	PCM-laasti .....	46
6	Betonin lämmönjohtavuusmittaukset .....	49
6.1	Koekappaleet .....	49
6.2	Mittausmenetelmävaihtoehdot ja mittausten määrä .....	50
6.3	Mittaustulokset .....	51
6.4	Tulosten tarkastelu .....	53
6.4.1	Tutkitut koekappaleet .....	53
6.4.2	Betonin lämmönjohtavuus kirjallisuudessa .....	54
6.5	Johtopäätös .....	54
7	Betonin ominaislämpökapasiteettimittaukset .....	55
7.1	Koekappaleet ja mittausmenetelmä .....	55
7.2	Mittaustulokset .....	55
7.3	Tulosten tarkastelu .....	57
7.4	Johtopäätös .....	58
8	Laite-erot .....	59
8.1	Koekappaleet ja mittausmenetelmä .....	59
8.2	Mittaustulokset .....	60
8.3	Tulosten tarkastelu .....	61
8.4	Johtopäätös .....	62
9	Yhteenveto .....	63
	Lähteet .....	66
	Liitteet .....	70

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\delta_p$	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryyn osapaine-erolla ilmoitettuna)	kg/(m·s·Pa)
$\delta_v$	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrypitoisuuserolla ilmoitettuna)	m <sup>2</sup> /s
$\lambda$	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
$\lambda_{10}$	lämmönjohtavuus, yksittäinen mittausarvo	W/(m·K)
$\lambda_D$	ilmoitettu lämmönjohtavuus	W/(m·K)
$\lambda_U$	lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo	W/(m·K)
$\lambda_{\text{mean}}$	keskimääräinen lämmönjohtavuus	W/(m·K)
$\varepsilon$	emissiiviteetti	-
$\mu$	jännite	V, $\mu\text{V}$
$v$	vesihöyrypitoisuus	g/m <sup>3</sup>
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\Phi$	lämpövirta	W
$\varphi$	ilman suhteellinen kosteus	% RH
$a$	terminen diffusiviteetti (lämpötilan tasoittumiskerroin)	m <sup>2</sup> /s
$b$	materiaalin lämpenemiskerroin	J/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ·K)
$C$	lämpökapasiteetti	J/K
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa	J/(kg·K)
$d$	paksuus	m
$g$	kosteusvirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$H$	entalpia	J
$L$	pituus	m, mm, $\mu\text{m}$
$m$	massa	g, kg
$n$	lukumäärä	-
$p$	paine	Pa
$Q$	lämpömäärä	J
$Q$	signaaliarvo	$\mu\text{V}$
$q$	lämpövuoto (lämpövirran tiheys)	W/m <sup>2</sup>
$R$	lämmönvastus	(m <sup>2</sup> ·K)/W
$S$	kalibrointikerroin	W/(m <sup>2</sup> ·V)
$s$	keskihajonta	-
$T$	lämpötila	K
$t$	aika	s
$V$	tilavuus	m <sup>3</sup>

GHP Guarded Hot Plate eli kuumalevyalaite

HFM Heat Flow Meter eli lämpövirtalevyalaite

IRMM Institute of Reference Materials and Measurements, Belgia

NIST National Institute of Standards and Technology, Yhdysvallat

TTY Tampereen teknillinen yliopisto, Suomi

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevien kaasujen pitoisuus- tai osapaine-eroja. Kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta matalampaan.
Faasimuutosmateriaali	Materiaali, jonka olomuoto riippuu lämpötilasta, paineesta ja tilavuudesta. Aine sitoo lämpöä ympäristön lämmitessä ja vapauttaa sitä ympäristön viiletessä eli toimii lämpöä tassaavasti.
Gain Level	Yksi FOX-lämpövirtalevylaitteen muutettavista parametreista. Taso vaikuttaa siihen, kuinka korkeita mikrovoltteja laite käyttää. Perustaso lämmönjohtavuusmittauksessa on 7 ( $\pm 20\,000\ \mu\text{V}$ ) ja ominaislämpökapasiteettimittauksessa 5 ( $\pm 80\,000\ \mu\text{V}$ ).
Homogeeninen	Aineksiltaan tasakoosteinen, yhtenäinen. Vastakohta heterogeeniselle.
Hygroskooppinen tasapainokosteus	Kosteuspitoisuus, joka sitoutuu stationääritilassa ilmasta aineeseen ympäristön tietyssä suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa.
Hygroskooppisuus	Aineen kyky sitoa itseensä ilmasta kosteutta ja luovuttaa sitä takaisin.
Ilmoitettu lämmönjohtavuus	$\lambda_D$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] tarkoittaa arvoa, jota käytetään rakenteiden lämpöteknisissä laskelmissa. Ilmoitettuun lämmönjohtavuuteen huomioidaan aineen lämmönjohtavuuden mittaustulosten hajonta sekä lämpötila, kosteuspitoisuus ja ikääntymisen vaikutukset.
Isotrooppinen	Suunnasta riippumaton. On samanlainen mihin suuntaan tahansa.
Keskimääräinen lämmönjohtavuus	$\lambda_{\text{mean}}$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] tarkoittaa 10 °C lämpötilassa tehtyjen yksittäisten mittaustulosten ( $\lambda_{10}$ ) aritmeettista keskiarvoa. Mittauksissa aineen kosteuspitoisuuden tulee olla 23 °C lämpötilassa ( $50 \pm 10$ ) % RH.
Kyllästyskosteuspitoisuus	Vallitsevassa lämpötilassa ilmassa olevan vesihöyrypitoisuuden enimmäisarvo. Symbolina $v_{\text{sat}}$ ja yksikkönä $\text{g}/\text{m}^3$ .
Laasti	Laasti on materiaali, joka koostuu sideaineesta, runkoaineesta, lisäaineista ja vedestä. Lisäaineiden tarkoituksena on saada aikaa haluttuja ominaisuuksia, esimerkiksi parantaa

	työstettävyyttä. Ainesosat ja sekoitussuhteet määräytyvät laastin käyttötarkoituksesta.
Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo	$\lambda_U$ [W/(m·K)] tarkoittaa arvoa, joka perustuu yleensä 10 °C keskilämpötilassa tehtyihin lämmönjohtavuuden mittauksiin sekä mittaustulosten tilastolliseen käsittelyyn.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(m·K)] kuvaa, kuinka hyvin materiaali johtaa lämpöä. Luku ilmoittaa lämpömäärän, joka läpäisee stationääritilassa tietyn kokoisen ainekerroksen, kun kerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen lämpötilaero. Lämpöä johtuu sitä paremmin, mitä suurempi lämmönjohtavuuden arvo on.
Lämpenemiskerroin	Materiaalin lämpenemiskerroin $b$ [J/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ·K)] kuvastaa materiaalin kykyä vaihtaa lämpöä ympäristönsä kanssa.
Lämpökapasiteetti	Lämpökapasiteetti $C$ [J/K] kuvaa tunnetun kappaleen lämmönsitomiskykyä.
Lämpömäärä	Lämpömäärä $Q$ [J] tarkoittaa lämpötilojen synnyttämän, liikkeessä olevan energian määrää eli systeemin molekyylien liike-energioiden summaa. Suuruus riippuu systeemin molekyylien määrästä, joka puolestaan riippuu systeemin massasta.
Lämpövirta	Lämpövirta $\Phi$ [W] on siirtyneen lämmön määrä aikayksikössä. Lämpövirralla voidaan kuvata lämpömäärän muutosnopeutta tai lämmön virtausnopeutta.
Lämpövuoto	Lämpövuoto $q$ [W/m <sup>2</sup> ] eli lämpövirran tiheys tarkoittaa lämpövirtaa pinta-alayksikköä kohden. Lämpövuolla arvioidaan lämmönhukkaa ja siten lämmityksen tarvetta.
Ominaislämpökapasiteetti	Ominaislämpökapasiteetti $c$ [J/(kg·K)] kuvaa materiaalin lämmönsitomiskykyä. Kiinteillä ja nestemäisillä aineilla ominaislämpökapasiteetti ei juuri riipu siitä, onko kyseessä vakiotilavuuden vai vakio paineen mukaan määritetty arvo. Kaasujen tapauksessa ominaislämpökapasiteetin yhteydessä ilmaistaan, onko se määritetty vakiotilavuudessa $c_v$ tai vakio paineessa $c_p$ .
PID-kerroin	Yksi FOX-lämpövirtalevylaitteen muutettavista parametreista. Kertoimet vaikuttavat lämpötilan tasoittumiseen. Laitteella on erikseen kertoimet lämpötilan tasoittumis- ja tasapainovaiheelle sekä näissä tapahtuvalle jäähtymykselle ja lämmitykselle.

Stationääritila	Jatkuvuustila, jossa systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa, eli niiden määrät eivät muutu ajan kuluessa.
Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus $\phi$ [% RH] ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn määrän suhteessa kyllästyskosteuspitoisuuden tiettyssä lämpötilassa.
Terminen diffusiviteetti	Terminen diffusiviteetti $a$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] tarkoittaa aineen kykyä johtaa lämpöä suhteessa kykyyn varastoida lämpöenergiaa. Aineet, joilla on suuri terminen diffusiviteetti, reagoivat nopeasti ympäristössään tapahtuviin termisiin muutoksiin. Tunnetaan suomeksi myös lämpötilan tasoittumiskertoimena.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_p$ [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ] tai $\delta_v$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] kertoo sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee tietyn kokoisin homogeenisen ainekerroksen eri puolilla olevan vesihöyryn osapaineen tai vesihöyrypitoisuuksien eron vaikutuksesta.
Vesihöyrypitoisuus	Vesihöyrypitoisuus $v$ kertoo ilmassa olevan vesihöyrymäärän. Vesihöyrypitoisuus ilmoitetaan yleensä grammoina kuutiometriä kohden [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]. Vesihöyrypitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan diffuusion avulla.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn taustaa

Tässä tutkimuksessa on selvitetty kevennys- ja faasimuutosaineiden lisäämisen vaikutuksia laastien rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin. Toiminnallinen täyteaine voi olla esimerkiksi kevennysaine, joka alentaa laastin painoa, tai faasimuutosmateriaali, joka olomuodonmuutoksillaan tasaa rakennuksen lämpötiloja ja jonka avulla on mahdollista saavuttaa energiasäästöjä rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysratkaisuissa. Lisäaineiden vaikutusten selvittämiseksi on tunnettava olemassa olevien tuotteiden ominaisuudet. Olemassa olevien laastituotteiden lisäksi tässä työssä tutkittiin myös yhtä faasimuutosmateriaalia sisältävää laastia.

Rakennusten lämmitysenergiantarve ja ilmastoinnin määrä vaihtelevat vuodenajan ja vuorokaudenajan mukaan. Varastoimalla energiaa rakenteisiin faasimuutosmateriaalien avulla voidaan säilyttää haluttu lämpötila vähemmällä energiantarpeella. Faasimuutoksen aikana materiaalin lämpötila ei nimittäin muutu, vaan kaikki energia kuluu materiaalin muuttamiseen olomuodosta toiseen. <sup>[1]</sup>

Faasimuutosmateriaalitutkimus on varsin ajankohtainen, kun otetaan huomioon rakennuksien energiatehokkuuteen kohdistetut odotukset. Tällä vuosituhannella energiamääräyksiä on kiristetty ja ne kiristyvät edelleen tulevien vuosien aikana. Julkisten kohteiden tulee olla lähes nollaenergiataloja vuonna 2019 ja uudisrakennuskohteiden vuonna 2021. <sup>[2]</sup>

Energiatehokkuusnormien kiristäminen johtuu siitä, että rakennusten energiatarvetta halutaan pienentää. Suomessa rakennusten osuus energian loppukäytöstä on noin 40 %, josta asuin-, liike- ja palvelurakennukset käyttävät 80 %. Energian loppukäytöstä lämmittämiseen kuluu neljännes. Asuinrakennusten lämmönkulutuksen jakaumassa ulko-vaipan lämpöhäviön osuus korostuu (42 %) ja toimistorakennuksissa ilmanvaihdon osuus (44 %). <sup>[3, s. 6–9]</sup> Kolmas merkittävä lämpöhäviöitä aiheuttava tekijä on lämmin käyttövesi. Lämpöhäviöitä on pyritty vähentämään kasvattamalla lämmöneristepaksuuksia ja parantamalla ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa, mutta suurilla lämmöneristepaksuuksilla lämmöneristyskyvyn parantuminen saattaa lisätä jäähdytystarvetta. Faasimuutosmateriaaleilla kyetään tasaamaan lämpötilavaihteluita ja siten vähentämään lämmitys- ja jäähdytystarvetta, minkä vuoksi faasimuutosmateriaalien hyödyntämis-mahdollisuus rakenteissa on selvittämisen arvoista.

## 1.2 Työn rakenne

Tämä diplomityö keskittyy lämpövirtalevylaitteiden avulla tehtävään Kiillon laastituotteiden lämmönjohtavuuksien ja ominaislämpökapasiteettien määrittämiseen. Mukana on yksi faasimuutosmateriaalia sisältävä laastituote. Samalla selvitetään sitä, miten uudella lämpövirtalevylaitteella voidaan määrittää lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvot betonille. Lisäksi tutkittiin uuden ja vanhan laitteen välisiä eroja. Laitte-erojen ymmärtäminen on tärkeää yliopistolla myöhemmin suoritettavien mittausten kannalta.

Työ koostuu kirjallisesta osuudesta ja tutkimusosuudesta. Kirjallinen osuus käsittelee lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin teoriaa, missä lämmön siirtymisestä ja sitoutumisesta esitetään oleelliset näihin liittyvät yhtälöt. Lämmön teorian lisäksi käsitellään lämpövirtalevylaitetta, jonka toiminnan ja epävarmuustekijöiden tunteminen on tärkeää mittaustulosten ymmärtämiseksi ja arvioimiseksi.

Tutkimusosuus käsittää koekappaleilla tehtävät lämmönjohtavuus- ja ominaislämpökapasiteettimittaukset sekä tulosten käsittelyn. Lukujen jäsentely on valittu vastaamaan kutakin mittaustapahtumaa siten, ettei mittaustietoa tarvitse etsiä muista tutkimusosuuden kappaleista.

## 1.3 Työn suoritus ja rajaukset

Kaikki työhön liittyvät työsuoritteet tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston tiloissa.

Laastikoekappaleet valmistettiin valmistajan ohjeen ja liittyvien standardien mukaisesti. Laastien lämmönjohtavuuksien selvittämiseen käytettiin kahta eri lämpövirtalevylaitetta, joista uudella (FOX50-lämpövirtalevylaitteella) mitattiin laastien lämmönjohtavuudet ja vanhemman (FOX304) antamia tuloksia käytettiin laite-erojen vertailuun. Laitte-eroja selvitettiin, koska haluttiin tietää, olisiko vanha lämpövirtalevylaitte soveltunut mittauksiin. Laastikoekappaleille määritettiin uudella laitteella myös ominaislämpökapasiteetit.

Betonikoekappaleet leikattiin ominaisuuksiltaan tunnetuista, ehjistä kappaleista. Betonin lämmönjohtavuuksia tutkittiin vain uudella laitteella, jonka soveltuvuus ja betonikoekappaleille sopivin mittausten menetelmä haluttiin selvittää. Lisäksi selvitettiin uuden lämpövirtalevylaitteen soveltuvuus betonien ominaislämpökapasiteettimittauksiin.

Työ rajoittui lämpövirtalevylaitteilla tehtäviin, edellä mainittuihin mittauksiin.



## 2 LÄMPÖ

### 2.1 Yleistä

Lämpöenergia on aineen atomien liikettä, ja lämpö liikkeessä olevan energian muoto, joka syntyy energialähteen ja kohteen välisestä lämpötilaerosta <sup>[4]</sup>. Lämpö on nimenomaan virtaavaa energiaa; pelkkää termodynaamiseen systeemiin varastoitunutta energiaa kutsutaan sisäenergiaksi. Sisäenergiasta ei voida mitata sen suuruutta tietyllä hetkellä, mutta sen muutos on mahdollista selvittää. Systeemin sisäenergian muutos on systeemiin tulleen lämpöenergian ja siihen tehdyn työn muutosten summa <sup>[4]</sup>.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (2.1)$$

missä

$\Delta U$	sisäenergian muutos (J)
$\Delta Q$	lämpöenergian muutos (J)
$\Delta W$	tehdyn työn muutos (J)

Termodynamiikan avulla voidaan kertoa, miten paljon energiaa tarvitaan muuttamaan aineen tasapainotila toiseksi, mutta se ei kerro muutokseen kuluvaan aikaan. Lämmön muutosnopeutta kuvataan lämpövirralla, joka on lämpöenergia jaettuna ajalla ja jonka yhtälö riippuu lämmön siirtymistavasta (ks. yhtälöt 2.17, 2.19 ja 2.21) <sup>[4]</sup>.

Entalpia puolestaan on sisäenergiasta johdettu käsite, jolla lasketaan muutosprosessin vaatima työ tai lämpö. Kuten lämpöenergiankin kohdalla, vain muutos on mahdollista mitata. Useimmissa vakiopainetapauksissa entalpian muutos on samansuuruinen kuin siirtyvä lämpöenergia <sup>[1]</sup>. Entalpian muutos ei ole riippuvainen siitä, kuinka alku- ja lopputilanteen välillä edetään, mutta muutoksen merkki muuttuu, jos prosessin suunta vaihtuu. Tämä tunnetaan Hessin lakina:

$$H = U + pV \quad (2.2)$$

missä

H	entalpia (J)
p	paine (Pa)
V	tilavuus (m <sup>3</sup> )

Jos entalpian arvo on positiivinen, on kyseessä lämpöä sitova eli endoterminen reaktio. Jos entalpia on negatiivinen, vapautuu lämpöä, ja reaktiota kutsutaan eksotermiseksi.

Faasimuutoksessa tapahtuvaa entalpiamuutosta kutsutaan faasimuutosentalpiaksi. Endotermisen faasimuutoksen aikana systeemin lämpötila ei muutu, vaan tuleva energia kuluu kokonaisuudessaan olomuodon muuttamiseen ja systeemin sisältämä lämpö kasvaa huomattavasti. Eksotermisessä faasimuutoksessa aineen olomuodon muuttaminen puolestaan vapauttaa energiaa ilman, että lämpötila muuttuu. <sup>[1]</sup>

## 2.2 Lämmön sitoutuminen

### 2.2.1 Teoriaa

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön, energian säilymislain, mukaan energiaa voidaan muuttaa toiseen muotoon, mutta ei luoda tai hävittää <sup>[5]</sup>. Säännön mukaan kappaleeseen siirtyvän lämpöenergian nettoarvon on siis varastoiduttava kappaleeseen. Energian varastoituminen ja vapautuminen voi tapahtua kahdella eri tavalla: tuntevan tai latentin lämmön avulla. Latentti lämpö tarkoittaa sulamisessa varastoituvaa ja jäähmettyessä vapautuvaa lämpöä eli se esiintyy faasimuutosten aikana. Tuntuva lämpö puolestaan liittyy sellaisiin lämpötilamuutoksiin, joissa aineen olomuoto ei muutu.

Lämpöyhtälö on lämmön energiatasapainon differentiaalinen kuvaus. Materiaalin lämpöenergia voi muuttua, jos energiaa lisätään tai sitä poistuu rajoittavan pinnan läpi tai jos materiaalissa syntyy tai siihen sitoutuu energiaa. Lämpöenergian muutosnopeus materiaalin sisällä on <sup>[6]</sup>

$$\dot{H} = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.3)$$

missä

$\dot{H}$	lämpöenergian muutosnopeus (W/m <sup>3</sup> )
$H$	entalpia (tai materiaalin lämpösisältö) (J/m <sup>3</sup> )
$t$	aika (s)

Termodynamiikassa entalpian muutos ilmaistaan materiaalin lämpötilan muutoksen avulla. Lämpötilan muuttuessa lämpötilasta  $T_1$  lämpötilaan  $T_2$  on yhtälö muotoa <sup>[6]</sup>

$$H = \int_{T_1}^{T_2} \rho c_p dT \quad (2.4)$$

missä

$\rho$	tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (J/(kg·K))
$T$	lämpötila (K)

Lämmön sitoutuminen materiaaliin on siis riippuvainen aineen kahdesta eri ominaisuudesta: tiheydestä ja ominaislämpökapasiteetista. Yhtälöstä 2.4 nähdään, että kumman tahansa ominaisuuden suureneminen lisää entalpian muutosta.

Yhdistämällä edellä mainitut yhtälöt 2.3 ja 2.4 saadaan lämpöenergian muutosnopeudelle ja lämpötilalle yhteys

$$\dot{H} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

Lämmön muutosnopeutta kuvaava lämpövirran tiheys lasketaan kappaleen tietyn pinta-alan  $dA$  tai tilavuusyksikön  $dV$  läpi. Ilmaisemalla sisäisen lämmön sitoutumis- tai kehitysnopeus jossain tietyssä kappaleen kohdassa vektorilla  $\mathbf{g}(\mathbf{r}, t)$  saadaan tilavuudelle  $V$  lämmön terminen tasapainoyhtälö 2.6. <sup>[6]</sup>

$$\int_V \frac{\partial H}{\partial t} dV = \int_V [-\nabla \cdot \mathbf{q} + g(\mathbf{r}, t)] dV \quad (2.6)$$

Koska integraalit ovat vastaavia, voidaan ne poistaa ja ilmaista yhtälö muodossa

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + g(\mathbf{r}, t) \quad (2.7)$$

Tätä yhtälöä kutsutaan lämpöyhtälöksi. Tietyissä tapauksissa sitä voidaan sieventää. Esimerkiksi yksinkertaiselle isotrooppiselle materiaalille se muuttuu muotoon <sup>[6]</sup>

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + g(\mathbf{r}, t) \quad (2.8)$$

ja jatkuvissa lämpöolosuhteissa (ei lämmöntuotantoa) <sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (2.9)$$

missä

$a$  on terminen diffusiviteetti ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Termistä diffusiviteettia voidaan käyttää, jos kappaleen lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys eivät ole riippuvaisia ajasta <sup>[6]</sup>. Terminen diffusiviteetti lasketaan yhtälöllä 2.10.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho_0} \quad (2.10)$$

Terminen diffusiviteetti kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä suhteessa kykyyn varastoida lämpöenergiaa. Aineet, joilla on suuri termien diffusiviteetti, reagoivat nopeasti ympäristössään tapahtuviin termisiin muutoksiin. [7] Yhtälöstä 2.10 havaitaan, että suuri diffusiviteetti voi olla seurausta suuresta lämmönjohtavuudesta tai alhaisesta ominaislämpökapasiteetista. Myös tiheyden kasvu pienentää diffusiviteettiä.

## 2.2.2 Ominaislämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetti kuvaa tunnetun kappaleen lämmönsitomiskykyä, ja ominaislämpökapasiteetti aineen lämmönsitomiskykyä [5]. Termien erona on siis se, että lämpökapasiteetti ilmoitetaan tunnettua kappaletta ja ominaislämpökapasiteetti massaa kohden.

Ominaislämpökapasiteetti kertoo, kuinka paljon lämpötilan nostamiseen yhdellä asteella tarvitaan energiaa tietyn aineen yhtä kilogrammaa kohden. Se määritellään siirtyvän lämpöenergian, tapahtuvan lämpötilanmuutoksen ja kappaleen massan avulla. [5] Ominaislämpökapasiteetti voidaan ilmoittaa joko vakioaineessa tai vakiotilavuudessa.

$$dQ = c_p \cdot m \cdot dT \Leftrightarrow c_p = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.11)$$

missä

Q	siirtyvä lämpöenergia (J)
m	massa (kg)
c <sub>p</sub>	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa (J/(kg·K))
T	lämpötila (K)

Lämpökapasiteetti lasketaan tunnettua kappaletta kohden, jolloin massaa ei tarvitse ottaa huomioon [5].

$$C = \frac{dQ}{dT} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.12)$$

Yhtälöistä 2.11 ja 2.12 nähdään, että kappaleen lämpökapasiteetti voidaan ilmoittaa myös ominaislämpökapasiteetin ja massan tulona.

$$C = c_p \cdot m \quad (2.13)$$

Aine laajenee, kun sitä lämmitetään, ja mikäli laajeneminen estetään, paine kasvaa. Aine tekee työtä laajetessaan, jolloin osa lämmittämiseen tarvittavasta energiasta menee tämän työn suorittamiseen. Aineen laajeneminen lämmitettäessä tulisikin ottaa huomioon ominaislämpökapasiteetilaskelmissa, mutta kiinteät ja nestemäiset aineet laajenevat lämmitessään niin vähän, että laajenemisen vaikutus voidaan jättää huomioon ottamatta [5]. Kaasujen tapauksessa ominaislämpökapasiteetti on hyvin riippuvainen siitä, lämpe-neekö se vakioaineessa vai -tilavuudessa.

## 2.3 Lämmön siirtyminen

### 2.3.1 Teoriaa

Lämmön siirtymistä tapahtuu vain eri lämpötiloissa olevien alueiden välillä. Termodynamiikan toisen pääsäännön, lämmön säilymislain, mukaan lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan eli kylmempi systeemi vastaanottaa yhtä suuren lämpömäärän kuin lämpimämpi luovuttaa <sup>[7]</sup>. Mitä tehokkaampaa lämmön siirtyminen on, sitä parempi on materiaalin energianvarastointikyky.

Lämmön siirtymistä voidaan kuvata eri ulottuvuuksissa. Useissa tilanteissa riittää tutkia yksiulotteista siirtymistä, mutta esimerkiksi rakennuksissa eri materiaalien liitoskohdissa on syytä ottaa huomioon moniulotteiset siirtymät. Moniulotteista lämpövirran tiheyttä kuvataan vektorilla, joka ilmaisee suunnan. <sup>[7]</sup>

$$\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z) \quad (2.14)$$

Suuruus saadaan vektorin pituudesta.

$$|\mathbf{q}| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \quad (2.15)$$

Siirtyneen lämmön määrä aikayksikössä ilmaistaan lämpövirran avulla. Se voidaan laskea yhtälöllä 2.16. <sup>[7]</sup>

$$\Phi = q \cdot A \quad (2.16)$$

missä

$\Phi$	lämpövirta (W)
$q$	lämpövirran tiheys (W/m <sup>2</sup> )
$A$	pinta-ala (m <sup>2</sup> )

Lämpövirran tiheyden yhtälö riippuu siirtymismuodosta. Lämmön siirtyminen voi tapahtua kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä.

### 2.3.2 Johtuminen yksiulotteisessa tapauksessa

Johtuminen on lämmön siirtymistä aineen sisällä tai kahden kosketuksissa olevan aineen välillä ilman, että atomit (tai molekyylit) vaihtavat paikkaa. Systeemin lämpimämmässä osassa atomeilla on keskimäärin enemmän kineettistä energiaa kuin viileämmän osan atomeilla, mikä synnyttää myös enemmän värähtelyä. Atomien väliset värähtelyt siirtävät lämpöenergiaa lämpimästä osasta viileämpään. <sup>[5]</sup> Johtumista hidastaa muun muassa materiaalin epähomogeenisuus. Yleensä kiinteissä aineissa tapahtuvasta lämmönsiirrosta suurin osa tapahtuu johtumalla.

Homogeenisessä ja isotrooppisessa kerroksessa esiintyvä johtumisesta aiheutuva lämpövirran tiheys saadaan laskettua Fourierin lain (yhtälö 2.17) avulla <sup>[7]</sup>. Laista käy ilmi lämpövirran tiheyden ja lämpötilan välinen yhteys.

$$q = -\lambda \nabla T = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

missä

$q$	lämpövirran tiheys (W/m <sup>2</sup> )
$\lambda$	lämmönjohtavuus (W/(m·K))
$\nabla T$	lämpötilagradientti (K)
$x, y, z$	suuntakoordinaatit (m)

Yhtälö 2.17 noudattaa termodynamiikan toista pääsääntöä, sillä etumerkki osoittaa, että yhtälössä lämpö kulkee alemmaa lämpötilaa kohten.

Usein rakennusfysikaalisessa tarkastelussa riittää Fourierin lain yksiulotteinen tapaus. Tällöin yhtälössä esiintyvä lämpötilagradientti on verrannollinen kappaleen pintojen lämpötilaeron ja kappaleen paksuuden osamäärään (eli  $\partial T / \partial x = -\Delta T / \Delta x$ ) <sup>[7]</sup>, ja Fourierin laki sievenee muotoon

$$q = q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.18)$$

missä

$d$	kappaleen paksuus (m)
-----	-----------------------

Yksiulotteinen kenttä toteutetaan puristamalla tasapaksu materiaalikappale kahden yhdensuuntaisen, eri lämpötilassa olevan isotermisen levyn väliin ja estämällä lämpöhäviöt ympäristöön. Mittausta jatketaan niin kauan, että on saavutettu stationääritila. <sup>[8]</sup>

## Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus kuvaa nimensä mukaisesti sitä, miten hyvin jokin aine johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuus muuttuu materiaalin tiheyden ja kosteuden sekä mittauksissa käytettävän lämpötilan mukaan. Yleensä systeemiä pidetään homogeenisenä niin, ettei lämmönjohtavuus ole paikasta riippuvainen ja pienillä lämpötilaeroilla lämmönjohtavuuden ajatellaan olevan vakio. Lähellä absoluuttista nollapistettä lämmönjohtavuuden on todettu kasvavan materiaaleilla voimakkaasti. <sup>[5]</sup>

Samalle materiaalille saattaa löytyä useampi eriniminen lämmönjohtavuuden arvo. Standardimittauksessa lämmönjohtavuus määritetään 10 °C lämpötilassa, jossa suoritettujen mittausten yksittäiset mittaustulokset ilmoitetaan termillä  $\lambda_{10}$ . Mitatuista  $\lambda_{10}$ -arvoista laskettu aritmeettisen keskiarvo ilmaistaan keskimääräisenä lämmönjohtavuutena  $\lambda_{\text{mean}}$ . Näiden kahden lisäksi on olemassa ilmoitettu lämmönjohtavuus  $\lambda_D$  ja läm-

mönjohtavuuden suunnitteluarvo  $\lambda_U$ . Ilmoitetun lämmönjohtavuuden perustana on  $\lambda_{10}$ -arvoille tehty tilastollinen käsittely. Ottamalla huomioon mittaustulosten hajonta sekä lämpötila, materiaalin kosteuspitoisuus ja ikääntyminen saadaan ilmoitetusta lämmönjohtavuudesta määritettyä suunnitteluarvo  $\lambda_D$ , jota käytetään rakenteiden lämpötekniisissä laskelmissa. [9] Tässä työssä mitataan vain yksittäisiä lämmönjohtavuuksia, joista lasketaan keskiarvoja.

Lämmöneristeillä tavoitellaan mahdollisimman pientä lämmönjohtavuutta ja johteilla suurta. Lämmönjohtavuuden suuruudella on suora vaikutus esimerkiksi rakennusosien U-arvoihin [10].

Materiaalien lämmönjohtavuus voidaan määrittää GHP- tai HFM-laitteella. GHP tulee sanoista *Guarded Hot Plate*, mikä tarkoittaa kuumalevylaitetta. GHP-menetelmässä kahden koekappaleen väliin laitetaan lämmitysvastus, johon syötetty sähköteho mitataan. Lämmitysvastus ympäröidään yhtä lämpimillä reunavastuksilla, jotta niiden välille ei synny lämpövirtaa. Kaiken keskiosan vastuksesta poistuvan lämmön on siten kuljetettava koekappaleen kautta. GHP on kalibroinnissa yleisimmin käytetty absoluuttinen menetelmä. [11]

HFM tulee sanoista *Heat Flow Meter*, suomeksi lämpövirtalevy-laite. Sitä käsitellään luvussa 3.

### 2.3.3 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy paikasta toiseen aineen virtauksen mukana ja sitä esiintyy erityisesti kaasujen kohdalla. Konvektio voi olla vapaata ja pakotettua. Pakotettu konvektio syntyy jonkin ulkopuolisen voiman, esimerkiksi tuulen tai puhaltimen, vaikutuksesta. Vapaa konvektio aiheutuu lämpötilaerojen seurauksena syntyneistä aineen tiheyseroista.

Konvektion lämmönsiirtokerroin kuvaa tapahtuvaa lämmönsiirtymistä. Kertoimen suuruus riippuu pinnan geometriasta ja laadusta, virtauskentästä sekä virtaavan aineen termodynaamisista ominaisuuksista. [4] Konvektiolla siirtyvä lämpövirran tiheys pinnasta ilmaan saadaan Newtonin laista (yhtälö 2.19) [7].

$$q_{conv} = \alpha_{conv}(T_s - T_a) \quad (2.19)$$

missä

$q_{conv}$	konvektiolla siirtyvä lämpövirran tiheys (W/m <sup>2</sup> )
$\alpha_{conv}$	konvektion lämmönsiirtokerroin (W/(m <sup>2</sup> ·K))
$T_s$	pinnan lämpötila (K)
$T_a$	ilman lämpötila (K)

Lämmönsiirtokerroin kertoo, kuinka suuri lämpövirta on pinta-alaa ja lämpötilaeroa kohti [4]. Lämmön siirtyminen lisääntyy kertoimen kasvaessa.

### 2.3.4 Säteily

Lämpösäteily on elektromagneettista säteilyä, joka ei tarvitse väliainetta lämmön siirtämiseen. Lämpösäteily kulkee tyhjiössä valonnopeudella. Osuessaan kappaleeseen säteily absorboituu osin tai kokonaan ja aiheuttaa samalla lämpötilan nousua.

Kappaleen lähettämän säteilyn määrä riippuu suoraan kappaleen lämpötilasta ja pinnan säteilyominaisuuksista. Jokainen kappale, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen, lähettää pitkäaaltoista säteilyä. Ideaalista lämpösäteilijää, joka absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn, kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Todelliset kappaleet ovat ns. harmaita kappaleita, jotka heijastavat osan lämpösäteilystä takaisin tai päästävät osan lävitseen tai tekevät molempia. Harmaan kappaleen lähettämän kokonaisenergian suuruus voidaan laskea yhtälöllä 2.20. <sup>[5]</sup>

$$E = \sigma \epsilon T^4 \quad (2.20)$$

missä

$E$	pinnan emittoima säteilyteho ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )
$\epsilon$	emissiiviteetti ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ )
$T$	lämpötila (K)

Jos kyseessä on ideaalinen lämpösäteilijä, on emissiiviteetti 1; muulloin se vaihtelee nollan ja yhden välillä. Harmaan kappaleen emissiiviteetin oletetaan olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. <sup>[12]</sup>

Säteilyssä lämpövirran tiheys lasketaan yhtälöllä 2.21.

$$q_{rad} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.21)$$

missä

$q_{rad}$	lämpövirran tiheys lämpösäteilyssä ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$T_s$	pinnan lämpötila (K)
$T_{sur}$	ympäröivien pintojen lämpötila (K)

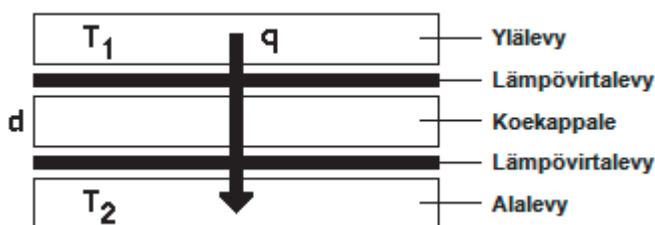
Yhtälössä 2.21 on oletettu Kirchhoffin lain mukaisesti, että harmaan kappaleen pinnan absorptiokerroin ja emissiiviteetti vastaavat toisiaan (eli  $\alpha = \epsilon$ ). <sup>[12]</sup>



### 3 LÄMPÖVIRTALEVYLAITE

#### 3.1 Laitteen toimintaperiaate

Materiaalin lämmönjohtavuus voidaan määrittää lämpövirtalevylaitteella. Lämpövirtalevylaitteeseen kuuluu ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä ympäröivä suojakuori. Tutkittava kappale puristetaan tiiviisti ylä- ja alalevyn väliin. Levyjen välille asetettava lämpötilaero synnyttää kappaleen läpi yksiulotteisen lämpövirran, jolloin voidaan käyttää yksiulotteista Fourierin lakia (yhtälö 2.18). Lämpövirran suuruus mitataan lämpövirtalevyjen avulla. Suojakuoren tarkoituksena on estää lämpöhäviöt.



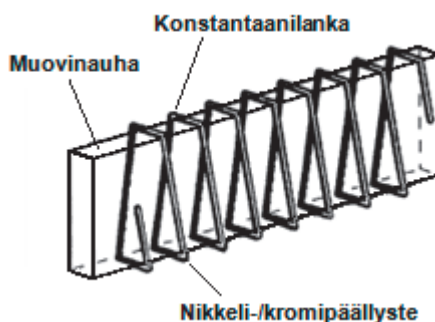
**Kuva 3.1.** Lämpövirtalevylaitteen periaate [13, s. 24].

Lämpövirtalevy koostuu ohuen muovinauhan ympärille kiedotuista termoelementtiketjuista eli metallilangoista, joiden joka toinen puolikerros on päällystetty eri metallilla. Levyjen pintojen välille muodostuva pieni lämpötilaero saa termoelementtiketjussa aikaan jännitteen, jonka suuruus on verrannollinen levyn läpäisevään lämpövirtaan. <sup>[13]</sup>

$$q = \mu \cdot S_{cal} \quad (3.1)$$

missä

- $q$  lämpövirran tiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $\mu$  termoelementtiketjun jännite ( $\mu\text{V}$ )
- $S_{cal}$  lämpövirtalevylaitteen levyn kalibrointikerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{V})$ )



**Kuva 3.2.** Lämpövirtalevyn rakenne [13, s. 23].

Yhtälössä 3.1 esiintyvällä kalibrointikertoimella on lämpövirtalevylaitteen toiminnan kannalta suuri merkitys. Kalibroinnissa selvitetään lämpövirran tiheyden ja termoelementteihin muodostuvan jännitteen välinen yhteys <sup>[13]</sup>. Yhteys on myös mahdollista laskea, mutta tällöin lämpövirtalevyn kaikkien materiaalien ominaisuudet on oltava tiedossa, mikä osoittautuu usein vaikeaksi. Kalibroinnissa käytetään yleisesti sellaista kalibrointikappaletta, jonka ominaisuudet tunnetaan absoluuttisesti <sup>[14]</sup>. Molemmille lämpövirtalevyille on omat kalibrointikertoimensa.

Yhdistämällä yksiulotteinen Fourierin lämpövirran tiheyden yhtälö 2.18 yhtälön 3.1 kanssa saadaan yhteys

$$\lambda \frac{\Delta T}{d} = \mu \cdot S_{cal} \quad (3.2)$$

missä

$\lambda$             lämmönjohtavuus (W/(m·K))

$d$             koekappaleen paksuus (m)

$\Delta T$         koekappaleen ylä- ja alapinnan lämpötilaero (K)

Kun kalibrointimateriaalina käytetään lämmönjohtavuusominaisuuksiltaan absoluuttisesti tunnettua materiaalia, voidaan kalibrointikerroin laskea mitattujen suureiden avulla yhtälöllä 3.2, kunhan yhtälössä esiintyvä jännite siirretään yhdysmerkin toiselle puolelle. Lämpövirtalevyalaite on mahdollista kalibroida myös käyttämällä kahta eripaksuista saman materiaalin kappaletta. Tällöin yhtälö on muotoa <sup>[14]</sup>

$$S_{cal} = \frac{\lambda_{cal} \cdot \Delta T \cdot (Q_1 - Q_2)}{(\Delta x_2 - \Delta x_1) \cdot (Q_1 \cdot Q_2)} \quad (3.3)$$

missä

$Q_1, Q_2$     kahden eri mittauksen signaaliarvot ( $\mu V$ )

$\Delta x_1, \Delta x_2$  kahden eri kappaleen paksuudet (m)

Kalibrointikerroin otetaan huomioon mittauksissa yksiulotteisen Fourierin lain yhtälöä käytettäessä, mikä muuttaa laskentayhtälöä hieman. Eräs lämpövirtalevylaitemalli on FOX, jota käytetään tämän diplomityön mittauksissa. FOX-laite laskee lämmönjohtavuuden yhtälöllä 3.4. <sup>[14]</sup>

$$\lambda_{test} = S_{cal}(T_{test})Q \frac{d_{test}}{\Delta T_{test}} \quad (3.4)$$

Kahdesta lämpövirtalevystä johtuen lämmönjohtavuudelle saadaan kaksi arvoa, joiden keskiarvo on koekappaleen lämmönjohtavuus. Lopullinen lämmönjohtavuus ilmoitetaan ylä- ja alapinnan lämpötilojen keskiarvossa  $T_m$ . <sup>[13]</sup>

Kaikkien lämmönjohtavuuteen vaikuttavien tekijöiden hallinta on hankalaa, minkä vuoksi materiaalin lämmönjohtavuuden määrittäminen tarkasti on vaativaa. Lisäksi lämmönjohtavuuksien ja siihen vaikuttavien ominaisuuksien arvot vaihtelevat eri materiaaleilla paljon, joten yhtä kaikille materiaaleille soveltuvaa laitetta ei ole onnistuttu kehittämään. Lämmönjohtavuuksia onkin mahdollista mitata tarkasti vain niillä laitteilla, jotka on kalibroitu vastaamaan tutkittavan materiaalin lämmönjohtavuusalueita.<sup>[13]</sup> Lämmöneristeiden lämmönjohtavuusmittauksia ohjaa standardi SFS-EN 12667 (2001)<sup>[11]</sup> ja korkeamman lämmönjohtavuuden materiaalien lämmönjohtavuusmittauksia standardi SFS-EN 12664 (2001)<sup>[15]</sup>. TTY:llä lämmöneristemateriaaleja on mitattu FOX304-laitteen avulla ja korkeamman lämmönjohtavuuden materiaalien mittaamiseen on hankittu FOX50-laite. Laitteita on käsitelty tämän luvun myöhemmissä kappaleissa 3.4 ja 3.5.

## **3.2 Koekappaleen ja lämpövirtalevyn kontakti**

### **3.2.1 Kontakti**

Koekappale tulee asettaa ylä- ja alapuolisen lämpövirtalevyn väliin mahdollisimman ilmatiiviisti, sillä näiden osien välinen kontakti on oleellinen mitattaessa lämmönjohtavuuksia. Laitteen omat lämpötila-anturit mittaavat lämpötilaa lämpövirtalevyistä, mutta niiden lämpötilat vastaavat koekappaleen pintojen lämpötiloja vain siinä tapauksessa, että kontakti on tarpeeksi hyvä.<sup>[16]</sup> Yksiulotteisen Fourierin lain yhtälössä oleva lämpötilaero on nimenomaan koekappaleen ylä- ja alapinnan lämpötilaero.

Mikäli koekappaleen ja lämpövirtalevyn väliin jää ilmaa, siirtyy lämpö laitteen levyistä koekappaleeseen johtumalla vain kosketuskohdissa. Pinnan ja ilman välisessä lämmönsiirrossa johtumisen osuus on marginaalisen pieni muihin lämmönsiirtotapoihin verrattuna, sillä ilma on hyvä lämmöneriste. Ilmassa säteilyn ja konvektion avulla tapahtuva lämmön siirtyminen ei myöskään ole yhtä tehokasta kuin mitä johtuminen kontaktikohdissa on.<sup>[13]</sup> Ilman eristyskyky ei juuri ole ongelma mitattaessa lämmöneristeitä, sillä ilman ja lämmöneristeen lämmönjohtavuudet ovat melko lähellä toisiaan. Sen sijaan korkeamman lämmönjohtavuuden materiaaleissa tästä aiheutuva virhe on merkittävä. Kontaktin merkitys siis kasvaa koekappaleen lämmönjohtavuuden kasvaessa.

Ilmarako aiheuttaa sen, että mittauslaite antaa koekappaleelle liian pienen lämmönjohtavuuden<sup>[16]</sup>. Ilmarakojen aiheuttamia virheitä voidaan vähentää käyttämällä koekappaleen pinnassa termolankoja, ohuita kumilevyjä tai sivelemällä koekappaleen ja levyn väliin kuparitahnaa. Uutena menetelmänä on kehitetty kahdella eripaksuisella koekappaleella tehtävä mittaus, jonka tuloksista laite laskee virheen suuruuden.

### **3.2.2 Kontaktin parantaminen**

Kontaktia parannetaan ensisijaisesti hiomalla koekappaleen pinta täysin sileäksi. Joihenkin materiaalien kohdalla tämä on kuitenkin vaikeaa, minkä vuoksi on kehitetty mui-

takin keinoja kontaktin parantamiseksi. <sup>[16]</sup> Yleisimpiä huonon kontaktin tai sen vaikutusten vähentämiskeinoja käsitellään seuraavaksi.

Koekappaleen ja lämpövirtalevyn välistä kontaktia voidaan parantaa väliin asetettavilla ohuilla kumilevyillä. Kumilevyjen tavoitteena on tasata koekappaleen pinnan epätasaisuuksia ja täyttää pienet ilmataskut ja -raot. Rosoisten koekappaleiden tapauksessa kumilevyt myös suojelevat lämpövirtalevylaitteen pintoja naarmuuntumiselta. Kumilevyjä käytettäessä niiden lämmönjohtavuus ja paksuus tulee olla tiedossa. <sup>[17]</sup> Nämä voidaan selvittää esimerkiksi FOX50- tai FOX304-lämpövirtalevylaitteella tehtävällä erillisellä mittauksella. Kumilevyjen lämmönjohtavuuden osuus vähennetään kumilevyjen väliin asetetulle koekappaleelle saadusta lämmönjohtavuuden arvosta.

Kumilevyjen vaikutusta lämmönjohtavuuslaskelmiin tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.4.6.

Toinen yleinen keino on mitata lämpötila suoraan koekappaleen pinnasta ja välttää täten huonosta kontaktista aiheutuvat virheelliset lämpötilatulokset. Termolangassa kahden rinnakkaisen, eri metalleista tehdyn johtimen päät on kiinnitetty toisiinsa niin, että kiinnityskohtaan syntyvä jännite on verrannollinen saman kohdan lämpötilaan <sup>[13]</sup>. Termolangat asetetaan mahdollisimman lähelle koekappaleen halkaisijalinjaa joko suoraan koekappaleen pintaan tai epätasaisen pinnan tapauksessa pieniin uriin mahdollisimman hyvän kontaktin aikaansaamiseksi. Uria käytettäessä koekappaleen paksuutena käytetään urien keskikohtien välistä matkaa, ei koekappaleen kokonaispaksuutta. <sup>[18]</sup> Urasyvyydeksi suositellaan termolangan halkaisijaa. Langat eivät saa koskettaa toisiaan.

Termolankojen välittämä tieto lämpötilasta luetaan jännitemittarilla tai muulla mittaukseen soveltuvalla laitteella. Ylä- ja alalevyn lämpötilaeron on termolankoja käytettäessä hyvä olla suurempi kuin standardeissa sanottu 20 kelvinastetta <sup>[13]</sup>, koska kaikki levyjen lämpö ei välity kappaleelle (syynä rosoisuus sekä urat) ja termolankojen välinen lämpötilaero jää asetettua pienemmäksi.

Termolankojen vaikutusta lämmönjohtavuuslaskelmiin tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.4.5.

Kolmas yleisesti käytetty keino on kuparitahnan käyttö koekappaleen pinnan ja lämpövirtalevyn välissä. Kuparitahnan tarkoituksena on toimia tehokkaana lämmönjohtimena. Tahna myös täyttää koekappaleen pinnan kuopat ja ilmaraot. Koska lämpö siirtyy tahnan läpi hyvin nopeasti, sen käytöllä ei ole merkittävää vaikutusta koekappaleen lämmönjohtavuuteen eikä sen käyttöä siten tarvitse ottaa huomioon erillisillä laskelmilla. <sup>[19]</sup>

### 3.3 Mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä

#### 3.3.1 Materiaalin tiheys

Materiaalin tiheys vaikuttaa siihen, miten lämpö välittyy levyiltä materiaaliin. Tiheimmissä aineissa lämpö siirtyy pääosin johtumalla. Harvemmissä materiaaleissa lämmön konvektion ja säteilyn osuudet ovat suurempia. <sup>[20]</sup>

### 3.3.2 Mittauslämpötila

Lämmönjohtavuus nousee mittauslämpötilan noustessa, useimmilla materiaaleilla suoran tai 2. tai 3. asteen polynomin mukaisesti. Kulmakerroin riippuu materiaalista. Standardikokeet on määritetty suoritettavaksi +10 °C keskilämpötilassa. Lämpötilaeroksi suositellaan standardissa vähintään 20 K, sillä mittausten tarkkuus riippuu eron suuruudesta.<sup>[20]</sup>

Lämpötilan muutosten vaikutukset materiaalissa olevaan kosteuteen tulee myös ottaa huomioon, sillä veden lämmönjohtavuus riippuu merkittävästi sen olomuodosta. Esimerkiksi jään lämmönjohtavuus on nelinkertainen sulaan veteen verrattuna.<sup>[20]</sup>

### 3.3.3 Koekappaleen kosteus

Materiaalin pintojen välinen lämpötilaero aiheuttaa vesihöyrypitoisuuseron, jonka uudelleentasapainottumiseen menee aikaa sitä enemmän mitä hygroskooppisempi materiaali on kyseessä. Vesihöyrypitoisuusero syntyy, kun materiaalin huokosilman suhteellinen kosteus pyrkii nousemaan lämpötilan laskiessa.<sup>[13]</sup> Nousseen suhteellisen kosteuden seurauksena materiaali sitoo itseensä lisää kosteutta huokosilmasta, mikä puolestaan alentaa huokosilman vesihöyrypitoisuutta kylmemmällä puolella. Vesihöyrypitoisuuseron seurauksena lämpimällä puolella hygroskooppisesti sitoutunut vesi höyrystyy ja kulkeutuu diffuusion avulla kylmempään pintaan. Kierro jatkuu, kunnes koko koekappale on asettunut uuteen hygroskooppiseen tasapainokosteuteensa.

Jos koekappaletta on säilytetty ennen koetta korkeassa suhteellisessa kosteudessa tai jos lämmönjohtavuuskoe suoritetaan esisäilytysvaihetta alemmassa keskilämpötilassa, saattaa kylmemmän levyn pintaan muodostua kondenssia<sup>[13]</sup>. Kondenssi syntyy, kun vesihöyrypitoisuus saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuuden. Kondenssin myötä koekappaleen kosteusmäärä alenee, minkä seurauksena mittauksissa materiaalille saadaan liian pieni lämmönjohtavuusarvo.

Ylä- ja alalevyjen synnyttämän lämpövirran suunnalla on merkitystä materiaalin kosteuden käyttäytymiseen. Jos kosteus tiivistyy kylmän levyn pintaan, kondensoitumisen aiheuttama lisäys lämpövirtaan on pienempi kylmällä alalevyllä kuin kylmällä ylälevyllä, sillä kosteus ei pääse silloin valumaan alaspäin takaisin koekappaleeseen<sup>[13]</sup>. Lämmönjohtavuuskokeissa mittausten kannalta onkin parempi, jos alalevy valitaan kylmemmäksi levyksi.

## 3.4 Mittauksissa käytettävä laite: FOX50

### 3.4.1 Laitteen esittely

FOX50 on korkeampia lämmönjohtavuuksia omaaville materiaaleille tarkoitettu lämpövirtalevy-laite, joka soveltuu valmistajan mukaan hyvin rakennusmateriaaleille kuten betonille ja tiilille<sup>[21]</sup>. Materiaaleja voidaan testata eri lämpötiloissa, ja koekappaleen kosteus saa vaihdella. FOX50-laitteita on kolme erilaista. TTY:n laitteen keskilämpötila

voidaan valita väliltä  $-10...+110\text{ }^{\circ}\text{C}$  <sup>[22]</sup>. Keskilämpötila tarkoittaa ylä- ja alalevyn lämpötilan keskiarvoa.

Laite puristaa koekappaleen levyjensä väliin noin 27 kiloa vastaavalla voimalla <sup>[21]</sup>, ja sen ylälevy kääntyy hieman saadakseen paremman kontaktin lievästi vinojen pintojen kanssa. Koekappaleen paksuutta ja lämpötiloja tarkkaillaan automaattisesti. Termolan-koja käytettäessä ne voidaan liittää suoraan FOX50-laitteeseen, joka ottaa huomioon niiden tulokset laskelmissaan. <sup>[22]</sup>



**Kuva 3.3.** Tampereen teknillisen yliopiston FOX50-lämpövirtalevyalaite.

FOX50-laitteen erikoisuutena on kahden eripaksuisen koekappaleen avulla tehtävä mittausten menetelmä (ns. *Two-thickness method*, ks. luku 3.4.7). Menettelyllä eliminoidaan ilman vaikutus mittaustuloksiin. Menetelmä on LaserCompin kehittämä eikä ole muiden laitevalmistajien käytössä. Menetelmä perustuu yksiulotteiseen Fourierin lakiin. <sup>[22]</sup>

FOX50 on standardien ASTM C518 (1998), ISO 8301 (1991), EN 12667 (2001), EN 1946-1 (1999) ja EN 1946-3 (1999) mukainen <sup>[22]</sup>. Laite täyttää valmistajan mukaan myös standardin EN 12664 (2001) <sup>[21]</sup> vaatimukset.

### 3.4.2 Koekappaleen koko

FOX50-laitteella tutkittava näyte on melko pieni, halkaisijaltaan 50–63 mm. <sup>[22]</sup> Syy sille, miksi koekappaleiden koko on rajoitettu pieneksi, on pinnoille helposti syntyvät ilmaraoit. Kun näytteiden kosketuspinta on pieni, koekappaleet on helpompi hioa sileiksi ja tasaisiksi, eli ilmarakojen välttäminen on helpompaa. <sup>[8]</sup>

Yleistä kappaleen vähimmäispaksuutta ei ole määritetty, vaan paksuuden (millimetreinä) tulee yksittäisissä mittauksissa olla vähintään kolme kertaa materiaalin lämmönjohtavuus yksikössä  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  eli kolme kertaa lambda-arvo. Tällöin kosketuksesta aiheutuva vastus eli pinnan resistanssi on ainakin kolme kertaa pienempi kuin näytteen

lämmönvastus ja sen aiheuttaman virheen osuus pienenee. Laitteeseen mahtuu enimmillään 25 millimetriä paksu koekappale. <sup>[8]</sup>

FOX50-laitetta ei ole tarkoitettu lämmöneristeiden lämmönjohtavuusmittauksiin, mutta sillä voidaan mitata lämmöneristeiden ominaislämpökapasiteetteja. Lämmöneristemittauksissa koekappaleen paksuus tulee rajoittavaksi, sillä paksumpi koekappale alkaa häiritä laitteen anturin lähettämää signaalia ja kokeen tarkkuus heikkenee. Tästä syystä valmistaja suosittelee käyttämään mitattavien lämmöneristemateriaalien enimmäispaksuutena 10 millimetriä. <sup>[8]</sup> Rajapaksuus perustuu valmistajan kokeisiin, jotka on tehty NIST SRM 1453 -materiaalilla.

### 3.4.3 Mittausalue ja -tarkkuus

FOX50 mittaa lämmönjohtavuuksia välillä 0,1–10 W/(m·K). Näin korkeille lämmönjohtavuuksille ei ole olemassa kansainvälistä standardia, mutta valmistaja on varmistanut laitteen toimivuuden laajoilla koemittauksilla. FOX50-laite voidaan valmistajan mukaan kalibroida mittaamaan myös alle 0,1 W/(m·K) lämmönjohtavuuksia, joskin näin alhaisiin lämmönjohtavuuksiin suositellaan käyttämään niille paremmin soveltuvia mittausrakenteita. <sup>[21]</sup>

FOX50-laite mittaa lämpövuota  $\pm 0,6$  mV, paksuutta  $\pm 0,001$  tuuman (noin  $\pm 0,025$  mm) ja lämpötilaa  $\pm 0,01$  °C tarkkuudella. FOX50-laitteen absoluuttiseksi tarkkuudeksi valmistaja määrittelee  $\pm 3$  %. <sup>[22]</sup> Laitteen tarkkuus on selvitetty käyttämällä standardisoitua koejärjestelyä ja kalibrointikertoimen sekä lämmönjohtavuuden yhtälöitä. Selvityksessä lämpöhäviöt laitteen reunojen kautta oletetaan mitättömiksi lämpövirran tiheyden suuruuteen verrattuna. <sup>[21]</sup>

Kokeiden toistettavuustarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa 0,2 % ja uusittavuustarkkuudeksi 0,5 %, jos kokeet tehdään tarkasti samalla tavalla. <sup>[22]</sup>

### 3.4.4 Kalibrointi

Eurooppalainen kalibroinnin vertailutaso esitetään IRMM:n ja yhdysvaltalainen NIST:n toimesta. Absoluuttisia kalibrointimenetelmiä on useampia, käytetyimpänä GHP. <sup>[11]</sup> FOX50-laitteelle on valmistajan toimesta luotu neljä eri kalibrointitiedostoa eri lämmönjohtavuusalueiden mittaamiseen. Kalibroinnissa käytetyt materiaalit ovat Pyrex 7740, Pyroceram 9606, Vespel DuPont ja Perspex <sup>[8]</sup>. Edellä mainittujen aineiden lämmönjohtavuudet on mitattu absoluuttisesti eri lämpötiloissa, jolloin on saatu taulukko 3.1. Perspexiä ei voida lämmittää yli 60 °C, minkä vuoksi siltä puuttuvat loput arvot.

**Taulukko 3.1.** FOX50-laitteen kalibroinnissa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuusarvot eri lämpötiloissa [8, s. 37].

Lämpötila T [°C]	Pyroceram 9606 (TPRC) $\lambda$ [W/(m·K)]	Pyrex 7740 (Powell, NBS) $\lambda$ [W/(m·K)]	Vespel DuPont (TPRC) $\lambda$ [W/(m·K)]	Perspex (NPL) $\lambda$ [W/(m·K)]
0	4,149	1,058	0,374	0,1860
10	4,091	1,073	0,376	0,1872
20	4,036	1,087	0,378	0,1885
30	3,985	1,102	0,380	0,1987
40	3,937	1,116	0,382	0,1909
50	3,892	1,131	0,384	0,1921
60	3,851	1,145	0,386	0,1933
70	3,811	1,160	0,388	
80	3,775	1,175	0,390	
90	3,741	1,189	0,392	
100	3,710	1,203	0,394	

Kalibroitinkappaleen lämmönjohtavuuden suhde mittauksen kohteena olevan kappaleen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa laitteen tekemiin laskelmiin [8]. Tämän vuoksi kalibrointiedostossa käytetyn materiaalin lämmönjohtavuuden arvon tulee olla lähellä mittauksissa käytettävän materiaalin lämmönjohtavuutta.

### 3.4.5 Termolankojen käytön vaikutus laskelmiin

FOX50-laitteessa käytetään E-tyyppin termolankoja [8]. Ne liitetään suoraan laitteeseen, jolloin laite laskee lämmönjohtavuuden termolankojen mittaamilla arvoilla (termolankojen käyttäminen on muistettava lisätä myös mittausasetuksiin) eikä erillisiä laskelmia tarvita. Ylemmän pinnan termolankojen johto liitetään ylempään pistokkeeseen ja alapinnan alempaan. Termolankoja käytettäessä olisi hyvä asentaa termolankojen ja lämpövirtalevyjen väliin ohuet kumilevyt tarkempien tulosten aikaansaamiseksi.

Termolankojen mittaamilla lämpötilatiedoilla FOX50-laitteen ohjelmisto laskee lämmönjohtavuuden koekappaleen pinnassa i yhtälöllä 3.5. [18]

$$\lambda_i = \frac{S_i \cdot \mu_i \cdot \Delta x}{T_i \cdot T_j} \quad (3.5)$$

missä

$S_i$  kalibroitinkerroin (W/(m<sup>2</sup>·μV))

$\mu_i$  jännite (μV)

$\Delta x$  termolankojen välimatka (m)

$T_i, T_j$  termolangoilla mitattujen pintalämpötilojen keskiarvot (K)



Yhtälön 3.1 mukaisesti kalibrointikertoimen ja jännitteen tulo on sama kuin lämpövirran tiheys, eli yhtälön 3.5 termien  $S_i$  ja  $\mu_i$  tulo voidaan korvata  $q_i$ :lla.

Termolankojen välimatka syötetään joko itse mitattuna tai urien syvyytenä, jolloin laite ottaa huomioon mittaamaansa paksuuteen urasyvyyden. Uran tulee olla yhtä syvä kuin termolangan, mikä tarkoittaa alle millimetriä, joten virheellisesti mitatun ja ilmoitetun urasyvyyden vaikutus mittauksiin on melko pieni. Laitevalmistaja ei ole ilmoittanut virheen tarkkaa suuruutta. Voidaan kuitenkin päätellä, että mitä paksumpi kappale on, sitä pienempi on väärin mitatun urasyvyyden aiheuttama virhe lopputulokseen.

### 3.4.6 Kumilevyjen käytön vaikutus laskelmiin

FOX50-laite ei ota huomioon kumilevyjen käyttöä, vaan niiden käyttö tulee ottaa huomioon erillisillä laskelmilla. Kumilevyjä voidaan käyttää niin termolankojen kanssa kuin yksinäänkin.

Kumilevyjen lämmönjohtavuus  $\lambda_{\text{kumilevyt}}$  ja paksuus  $d_{\text{kumilevyt}}$  tulee selvittää erillisellä kokeella, jossa mitataan molemmat kumilevyt samanaikaisesti. FOX50-laitteen valmistaja suosittelee käyttämään kumilevyjen lämmönjohtavuuden määrityskokeissa tavanomaista korkeampia signaaliarvoja (ns. *Gain Level*) johtuen kumin rakenteesta. Suositustaso on 5, joka vastaa arvoa 80 000  $\mu\text{V}$ , kun perustaso on 7 (20 000  $\mu\text{V}$ ).<sup>[17]</sup> Tässä työssä käytettävien kumilevyjen ominaisuudet selvitettiin kolmella mittauksella, joista kumilevyjen paksuudeksi saatiin 1,55 mm ja lämmönjohtavuudeksi 0,2185 W/(m·K). Kumin vanhenemisen vuoksi ominaisuudet on syytä määrittää uudelleen aika ajoin.

**Taulukko 3.2.** Kumilevyjen paksuuden ja lämmönjohtavuuden mittaukset, kesäkuu 2013.

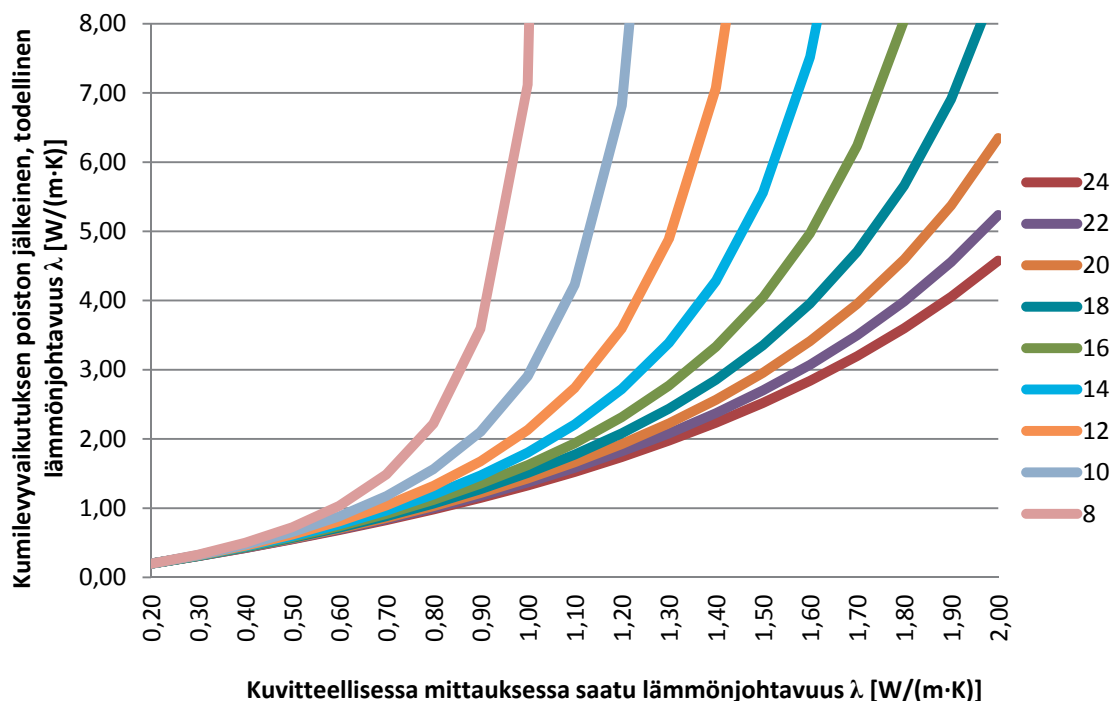
	Paksuus $d$ [mm]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(m·K)]
Testi 1	1,55	0,2191
Testi 2	1,55	0,2184
Testi 3	1,55	0,2180
<b>Keskiarvo</b>	<b>1,55</b>	<b>0,2185</b>

Kun varsinaisissa mittauksissa koekappaleelle (jonka molemmiin puolin on koetilanteessa ollut kumilevy) on saatu sen ja levyjen yhteinen lämmönjohtavuus ja paksuus, voidaan tutkittavan materiaalin lämmönjohtavuus laskea yhtälöllä 3.6.<sup>[17]</sup>

$$\lambda = \frac{d_{\text{koekappale+kumilevyt}} - d_{\text{kumilevyt}}}{\left( \frac{d_{\text{koekappale+kumilevyt}}}{\lambda_{\text{koekappale+kumilevyt}}} - \frac{d_{\text{kumilevyt}}}{\lambda_{\text{kumilevyt}}} \right)} \quad (3.6)$$

Tarkastellaan seuraavaksi yhtälön 3.6 toimivuutta eri tilanteissa. Kuvassa 3.4 vaakakselina on kuvitellusta mittauksesta saatava lämmönjohtavuusarvo kymmenyksen vä-

lein ja pystyakselina kumilevyvaikutuksen vähentämisen jälkeinen lämmönjohtavuus. Kukin käyrä kuvaa eripaksuisia koekappaleita. Esimerkiksi jos mittausarvo on  $0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , on lopullinen arvo paksuudesta riippuen väliltä  $0,7\text{--}1,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Kumilevyjen tietoina ovat taulukon 3.2 keskiarvot.



**Kuva 3.4.** Kumilevyvaikutus eripaksuisilla kappaleilla eri lämmönjohtavuuksissa.

Kuvasta 3.4 nähdään, että lämmönjohtavuus alkaa jossain vaiheessa nousta erittäin nopeasti, ohuilla kappaleilla aiemmin kuin paksuilla. Tämä pitää ottaa huomioon tuloksien tarkastelussa, sillä pienikin virhe ohuen kappaleen arvossa saattaa vaikuttaa merkittävästi laskettuun lämmönjohtavuuteen. (Lopulta lämmönjohtavuus painuu yhtälöllä 3.6 laskien alle nollan, mikä johtuu yhtälön nimittäjästä. Kappaleen paksuuden ollessa pieni suhteessa sen lämmönjohtavuuteen, on näiden osamäärä pienempi kuin kumilevyn vastaava ja tulos muuttuu negatiiviseksi. Tällä ei ole mitään tekemistä todellisuuden kanssa. Yhtälön toiminnalla on siis rajansa.)

Tarkastellaan kumilevyjen vaikutusta vielä tarkemmin. Taulukossa 3.3 on esimerkkinä esitetty kymmenen millimetriä paksun koekappaleen lopullisen lämmönjohtavuuden vaihteluväli. Laskennassa on käytetty kuvitteellista materiaalia, jonka lämmönjohtavuus on tasan  $0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Sekä FOX50- että FOX304-lämpövirtalevylaitteen absoluuttinen mittaustarkkuus on  $\pm 3 \%$ , mikä on siten myös sallittu vaihteluväli. Tämän vaihteluvälin raja-arvoille on laskettu toiseksi viimeiseen sarakkeeseen todelliset arvot, joiden ero oikeaan arvoon on esitetty viimeisessä sarakkeessa. Taulukossa 3.4 on vastaavat 20 millimetriä paksun kappaleen tulokset.

**Taulukko 3.3.** Laitteen virhemarginaalin suuruisen virheen vaikutus lopullisen lämmönjohtavuuden arvoon kumilevymittauksissa kappaleella, jonka kuviteltu mitattu lämmönjohtavuus on  $0,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ja paksuus 10 millimetriä.

Paksuus d [mm]	"Mitattu" arvo $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	Ero	"Todellinen" arvo $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	Ero $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$
10,0	0,776	-3 %	1,459	-0,104
10,0	0,800	0 %	1,563	0,000
10,0	0,824	+3 %	1,676	0,113

**Taulukko 3.4.** Laitteen virhemarginaalin suuruisen virheen vaikutus lopullisen lämmönjohtavuuden arvoon kumilevymittauksissa kappaleella, jonka kuviteltu mitattu lämmönjohtavuus on  $0,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ja paksuus 20 millimetriä.

Paksuus d [mm]	"Mitattu" arvo $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	Ero	"Todellinen" arvo $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	Ero $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$
20,0	0,776	-3 %	0,988	-0,043
20,0	0,800	0 %	1,030	0,000
20,0	0,824	+3 %	1,074	0,044

Taulukosta 3.3 nähdään, että esimerkissä käytetyn kappaleen todellinen lämmönjohtavuus kumilevyvaikutuksen vähentämisen jälkeen on  $1,56 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , mutta virhemarginaalin sisällä arvot vaihtelevat kymmenyksen yli ja alle. Pieneltä vaikuttava virhemarginaali sallii siis ohuilla kappaleilla varsin suuren, noin 0,2 yksikön, eron lämmönjohtavuuksille. Vastaavasti 20 millimetriä paksun kappaleen todellinen lämmönjohtavuus mitatusta  $0,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ :stä on  $1,030 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ja vaihteluväli  $\pm 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Tässä lämmönjohtavuuksien välinen ero on alle puolet siitä, mitä se oli 10 mm kappaleella.

Mittauksissa mitataan usein saman materiaalin eripaksuisia kappaleita, jolloin lopullisen lämmönjohtavuuden tulisi luonnollisesti olla sama. Jotta mainittu 10 mm kappale saisi saman lämmönjohtavuuden kuin 20 mm kappale taulukossa 3.4, sen mitatun lämmönjohtavuuden tulisi olla  $(0,65 \pm 0,02) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ja todellinen arvo olisi  $0,95\text{--}1,09 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Vaihteluväli olisi siis  $\pm 0,06 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , mikä on paksumman kappaleen vastaavaa vain hieman suurempi.

Kuvasta 3.4 nähdään, että vastaavanlaiset tilanteet toistuvat suuremmilla lämmönjohtavuuksilla, mutta merkittävimmin eroin. Kuvan ja esimerkkien perusteella voidaan todeta, että mittaustuloksiin tulee suhtautua sitä kriittisemmin mitä ohuempi kappale on kyseessä ja että korkeampia lämmönjohtavuuksia mitattaessa tulisi käyttää paksuja kappaleita.

### 3.4.7 Two-thickness method

FOX50-laite osaa selvittää koekappaleen todellisen lämmönjohtavuuden ilmaraoista huolimatta, mikäli käytössä on kaksi samasta materiaalista tehtyä, eripaksuista kappaleita. Paksuuseron tulisi olla havaittava, sillä pienillä paksuuseroilla laite ei välttämättä saa

virhettä selville. <sup>[8]</sup> Itse laskenta perustuu samaan yksiulotteiseen Fourierin lakiin, johon laitteen muukin mittaustulos perustuu.

Two-thickness-menetelmässä olennaista on selvittää pinnan lämmönvastus  $2R$ , joka ratkeaa yhtälöryhmästä 3.7. <sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{\Delta T}{S_{cal} \cdot \left( \frac{\Delta x_1}{\lambda} + 2R \right)} \\ Q_2 = \frac{\Delta T}{S_{cal} \cdot \left( \frac{\Delta x_2}{\lambda} + 2R \right)} \end{cases} \quad (3.7)$$

missä

$Q$	signaaliarvo ( $\mu V$ )
$\Delta T$	lämpötilaero (K)
$S_{cal}$	kalibrointikerroin ( $W/(m^2 \cdot \mu V)$ )
$\Delta x$	kappaleen paksuus (m)
$\lambda$	lämmönjohtavuus ( $W/(m \cdot K)$ )
$2R$	kahden pinnan lämmönvastus ( $(m^2 \cdot K)/W$ )

Osamäärä  $\Delta x/\lambda$  kuvaa kappaleen omaa lämmönvastusta <sup>[8]</sup>. Yleensä lämmöneristeillä se on huomattavasti pinnan lämmönvastusta suurempi, jolloin pinnan lämmönvastus jätetään ottamatta huomioon. Sen sijaan korkean lämmönjohtavuuden materiaaleilla pinnan lämmönvastus voi olla jopa suurempi kuin kappaleen lämmönvastus eikä sitä voida jättää pois.

Kun lämmönjohtavuusmittaus suoritetaan kahdesti, jää yhtälöön vain kaksi tuntematonta:  $\lambda$  ja  $2R$ . Nämä voidaan laskea yhtälöillä 3.8 ja 3.9. <sup>[8]</sup>

$$\lambda = \frac{S_{cal} \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot (\Delta x_2 - \Delta x_1)}{\Delta T \cdot (Q_1 - Q_2)} \quad (3.8)$$

$$2R = \frac{\Delta T \cdot (\Delta x_2 \cdot Q_2 - \Delta x_1 \cdot Q_1)}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot S_{cal} \cdot (\Delta x_2 - \Delta x_1)} \quad (3.9)$$

Vastus  $2R$  voidaan selvittää myös suorittamalla two-thickness-mittaus kahdella muulla saman materiaalin koekappaleella ja käyttämällä niiden avulla määritettyä vastusta kolmannella kappaleella. <sup>[8]</sup> Yleensä vastusta ei kuitenkaan selvitetä, vaan käytetään laitteen kalibrointitiedoista löytyviä vastusarvoja, joskin tällöin tulosten oikeellisuus heikkenee, jos ero kalibrointidatan ja mittaustuloksen välillä on suuri.

### 3.5 Vertailulaite: FOX304

#### 3.5.1 Laitteen esittely

LaserCompin kehittämä FOX304-laite on tarkoitettu lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuuksien mittaamiseen. Siinä käytetään neliönmallisia koekappaleita, joita voidaan testata eri lämpötiloissa ja joiden kosteuspitoisuus saa vaihdella. FOX304-laitteen levylämpötila voidaan valita väliltä  $-20...+95\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ja lämpövirta voi kulkea ylälevyltä alalevylle ja päinvastoin. <sup>[23]</sup> Levylämpötila tarkoittaa nimenomaan levyjen lämpötilaa, ei niiden välistä keskilämpötilaa.

FOX304-laitteessa on lineaarisen gradientin vahti sekä aktiivinen lämmitys- ja viilennystoiminto kaikilla neljällä sivulla. Näiden ansiosta koetulosten virheet vähenevät. <sup>[23]</sup>



**Kuva 3.5.** Tampereen teknillisen yliopiston FOX304-lämpövirtalevyalaite.

FOX304-laitteen mittausalue on  $0,005\text{--}0,35\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Laite mittaa lämpövuota  $\pm 0,6\text{ mV}$ , paksuutta  $\pm 0,001$  tuuman (noin  $\pm 0,025\text{ mm}$ ) ja lämpötilaa  $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  tarkkuudella. Laitteen mittaustarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa  $\pm 1\text{ }%$ , mikä tarkoittaa kalibrointiepävarmuus huomioon ottaen absoluuttisena tarkkuutena  $\pm 3\text{ }%$ . Toistettavuus- ja kokeen uusimistarkkuus ovat samat kuin FOX50-laitteella eli  $0,2\text{ }%$  ja  $0,5\text{ }%$ . <sup>[23]</sup>

FOX304-laitteella tutkittavan koekappaleen sivumitat ovat enimmillään  $305\text{ mm}$  suuntaansa ja paksuus  $0\text{--}102\text{ mm}$  <sup>[23]</sup>. Lämpövirtalevyt sijaitsevat levyissä keskellä ja niiden sivumitta on  $101\text{ mm}$  suuntaansa. Koekappaleen tulee peittää koko mittausalusta. Mikäli tutkittava kappale on mittausalustaa pienempi, tulee sen ympärille rakentaa EPS-eristeestä tai vastaavasta reunukset, joiden avulla mittausalusta peittyy kauttaaltaan. Samaa menetelmää käytetään irtomateriaalien testaamiseen. <sup>[24]</sup>

FOX304-laitteessa on valmiina kalibrointitiedostoja materiaalin paksuuksia vastaavasti, mutta halutessaan käyttäjä voi lisätä uusia. Ellei muita tiedostoja ole, tulee käytettävä kalibrointitiedosto valita koekappaleen paksuuden perusteella. <sup>[23]</sup> TTY:n FOX304-

laitteesta löytyy kalibrointitiedostot 25 mm, 50 mm, 75 mm ja 100 mm ainepaksuuksille (standardin NIST 1450b mukaisia) sekä eurooppalaisen standardin mukainen IRMM-PTS-tiedosto <sup>[21]</sup>. Itse laite noudattaa standardeja ASTM C518 (1998), ISO 8301 (1991), EN 12667 (2001), EN 1946-1 (1999) ja EN 1946-3 (1999) <sup>[23]</sup>.

### 3.5.2 Termolankojen käytön vaikutus laskelmiin

Mittauksissa on otettava huomioon, että termolankojen käyttö FOX304-laitteessa on monimutkaisempaa kuin FOX50-laitteessa, sillä termolankoja ei voida kiinnittää suoraan laitteeseen. Termolankojen mitaamat lämpötilat tulee ottaa huomioon erillisillä laskelmilla, joissa käytettävät yhtälöt on esitelty luvussa 3.4.5. <sup>[23]</sup>

### 3.5.3 Kumilevyjen käytön vaikutus laskelmiin

Kumilevyjen käyttö otetaan huomioon vähentämällä niiden vaikutus samalla tavalla kuin aiemmin, ks. luku 3.4.6.

## 3.6 Ominaislämpökapasiteetti FOX50-laitteella

Tavallisesti ominaislämpökapasiteetti määritetään kalorimetrillä, ja lämpövirtalevylaitetta käytetään vain lämmönjohtavuuksien selvittämiseen. Lämpövirtalevylaitteen mitaamat arvot soveltuvat kuitenkin myös muiden lämpöominaisuuksien määrittämiseen, ja sen voidaan laittaa toimimaan kalorimetrin tapaan. Teorian mukaan ylä- ja alalevyjen arvot ovat verrannollisia näytteen kahdelta reunalta lähtevän tai niihin tulevan lämpövuon tiheyteen kerrottuna laitteen mitaamalla aikavälillä <sup>[25]</sup>. Ominaislämpökapasiteettimittaus suoritetaan FOX50-laitteella lämmittämällä aluksi sekä ala- että ylälevy samaan lämpötilaan. Kun tasapainoasema on saavutettu ja laskelmissa tarvittavat mittaus suureet saatu selville, aletaan lämpötilaa nostaa seuraavaan asetettuun lämpötilaan. Noston aikana laite mittaa ylä- ja alalevystä lähtevän lämpömäärän ja seuraavan lämpötilan saavuttamiseen kuluvan ajan. Menetelmälle on standardi ASTM C1784-13 (2013).

Mittauspisteiden alussa saattaa esiintyä virhearvoja, jotka alentavat mittausarvoa. Suurentamalla mikrovolttien määrää (eli alentamalla *Gain Level* -tasoa) voidaan vähentää virheitä. <sup>[26]</sup> Toinen parannuskeino on PID-kertoimien muuttaminen. PID-kertoimet vaikuttavat lämpötilojen tasoittumiseen. <sup>[21]</sup> Lämpötilaväli voi pienimmillään olla 2 °C <sup>[27]</sup>.

Lämpövirtalevylaitteella voidaan määrittää lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin lisäksi terminen diffusiviteetti ja materiaalin lämpenemiskerroin. Näistä neljästä kahden tunteminen riittää muiden laskemiseen. <sup>[25]</sup>

Ominaislämpökapasiteettimittauksissa näyte sitoo itseensä lämpöä. Lämmön määrä voidaan laskea yhtälöllä <sup>[25]</sup>

$$H = \sum_{i=1}^n \tau \cdot [S_{Ucal} \cdot (Q_{Ui} - Q_{Uequil}) + S_{Lcal} \cdot (Q_{Li} - Q_{Lequil})] \quad (3.10)$$

missä

$H$	lämmön määrä ( $\text{J}/\text{m}^2$ )
$\tau$	aikaväli (s)
$S_{\text{Ucal}}$	ylemmän lämpövirtalevyn kalibrointikerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{V})$ )
$S_{\text{Lcal}}$	alemmän lämpövirtalevyn kalibrointikerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{V})$ )
$Q_{\text{Ui}}$	ylemmän lämpövirtalevyn signaaliarvo ( $\mu\text{V}$ )
$Q_{\text{Li}}$	alemmän lämpövirtalevyn signaaliarvo ( $\mu\text{V}$ )
$Q_{\text{Uequil}}$	ylemmän lämpövirtalevyn signaaliarvo tasapainotilanteessa ( $\mu\text{V}$ )
$Q_{\text{Lequil}}$	alemmän lämpövirtalevyn signaaliarvo tasapainotilanteessa ( $\mu\text{V}$ )

Summassa on mukana myös lämpövirtalevyjen itsensä sitoman lämmön määrä. Tämä osuus tulee poistaa oikean tuloksen saamiseksi. Osuus voidaan saada selville esimerkiksi kahden eri paksuisen koekappaleen avulla. Kahden näytteen kokeessa syntyy yhtälöryhmä 3.11 <sup>[25]</sup>.

$$\begin{cases} c_p \rho x_1 + c_p \rho' 2\delta x' = \frac{H_1}{\Delta T} \\ c_p \rho x_2 + c_p \rho' 2\delta x' = \frac{H_2}{\Delta T} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\Rightarrow c_p \rho = \frac{H_2 - H_1}{\Delta T \cdot (x_2 - x_1)} \quad (3.12)$$

$$\Rightarrow c_p \rho' 2\delta x' = \frac{H_1 \cdot x_2 - H_2 \cdot x_1}{\Delta T \cdot (x_2 - x_1)} \quad (3.13)$$

missä

$c_p$	kappaleen ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )
$c_p'$	levyjen ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )
$\rho$	kappaleen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho'$	levyjen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$x_1, x_2$	kappaleen paksuus (m)
$2\delta x'$	lämpövirtalevyjen paksuus (m)
$\Delta T$	lämpötilamuutos (K)

Vaihtoehtoisesti lämpövirtalevyjen ominaislämpökapasiteetti tilavuutta kohden voidaan mitata suorittamalla mittaus ilman näytettä. Valmistajan suorittamien tarkastelujen perusteella se on tarkin menetelmä. Ilman näytettä yhtälö 3.13 sievenee muotoon 3.14. <sup>[25]</sup>

$$c_p \rho' 2\delta x' = \frac{H}{\Delta T} \quad (3.14)$$

Kun levyjen ominaislämpökapasiteetti tilavuutta kohden tiedetään, saadaan koekappaleen ominaislämpökapasiteetti tilavuutta kohden yhtälöstä 3.15.

$$c_p \rho = \left( \frac{H}{\Delta T} - c_p \cdot \rho \cdot 2 \delta x \right) \cdot \frac{1}{x} \quad (3.15)$$

FOX50-laite käyttää ominaislämpökapasiteetin laskemisessa yhtälöä muodossa 3.16. Ominaislämpökapasiteetti saadaan jakamalla yhtälö materiaalin tiheydellä.

$$c_p \rho = \frac{H_{last} - H_{hfm}(T) \cdot \Delta T}{x \cdot \Delta T} \quad (3.16)$$

missä

$H_{hfm}(T)$  korjauskerroin, jolla vähennetään levyjen osuus

Kun kappaleen lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti ovat tiedossa, voidaan terminen diffusiviteetti laskea yhtälöllä 2.10 ja materiaalin lämpenemiskerroin yhtälöllä 3.17. [25]

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho_0} \quad (3.17)$$

Menetelmän luotettavuutta on selvitetty valmistajan toimesta suoritetuissa ominaislämpökapasiteettikokeissa. Niissä on käytetty tunnettuja materiaaleja, joiden tässä esitetyn menetelmän avulla mitatut ominaislämpökapasiteetit ovat poikenneet kirjallisuusarvoista 3–5 % [25].



## 4 LAASTIEN LÄMMÖNJOHTAVUUSMITTAUKSET

### 4.1 Laastikoekappaleiden valmistus ja säilytys

Tutkittavia laasteja oli 18 erilaista, joista jokaisesta valmistettiin kolme ohutta ja kolme paksumpaa koekappaletta lämmönjohtavuusmittauksiin. Kahta paksua koekappaletta käytettiin myös ominaislämpökapasiteettimittauksissa. Ohuen koekappaleen paksuus oli noin 10 mm ja paksumman 20 mm. Näiden lisäksi osasta laasteista valmistettiin myös isompia koekappaleita FOX304-laitteelle. Kaikkiaan valmistettiin 122 koekappaletta.

**Taulukko 4.1.** Tutkittavat laastituotteet. Ne tuotteet, joista ei ollut koekappaletta FOX304-laitteen mittauksiin, on merkitty tähdellä \*.

Lattiatasoiitteet	Kiinnityslaastit	Seinätasoiitteet	Muut
Kiilto 70	Superfix DF	Kiilto SR DF	EPS-pitoinen laasti
Lattialämmitystasoiite DF	Saneerauslaasti Flexfix	Kiilto OT *	PCM-laasti *
Multiplan	Lattialaasti DF	Kiilto OTR	
Topplan	Highflex S2	Kiilto OT Light	
Tasoflex *		Kiilto KL	
		Kiilto TT	
		Kiilto Saumalaasti nro 39 *	

Laastit sekoitettiin laboratoriosekoittimessa valmistajan ohjeen mukaisilla ainessuhteilla ja ajoilla. Mikäli ohjeessa mainittiin lisättävälle vesimäärälle jokin tilavuusväli (esimerkiksi 4,5–5 litraa), käytettiin keskiarvoa (esimerkissä 4,75 litraa). Laasti kaadettiin öljyttyihin vanerimuotteihin, pinta tasattiin ja muotit käärittiin kelmuun ensimmäisen vuorokauden ajaksi. Säilytysolosuhteet olivat standardin SFS-EN 1015-11+A1 (2007) taulukon *Taulukko 1 – Koekappaleiden valmistaminen ja säilytys* <sup>[28, s. 7]</sup> mukaisia: Ensimmäiset kaksi vuorokautta koekappaleita pidettiin muotissaan ( $95 \pm 5$ ) % RH suhteellisessa kosteudessa, minkä jälkeen muotti poistettiin ja koekappale jäi samoihin olosuhteisiin viideksi vuorokauksi. Tämän jälkeen koekappale siirrettiin kosteuskaapissa ristikkoalustan päälle ( $65 \pm 5$ ) % RH suhteelliseen kosteuteen vähintään 21 vuorokauksi ennen kokeiden aloitusta. Itse mittauksissa käytettiin hyväksi standardin SFS-EN 12667 (2001) ohjeistusta, jonka mukaan lämpötila on  $(23 \pm 2)$  °C ja suhteellinen kosteus  $(50 \pm 10)$  % RH <sup>[11]</sup>. Ohjeistus on sama standardissa SFS-EN 12664 (2001) <sup>[15]</sup>.

Mainitun taulukon <sup>[28, s. 7]</sup> mukaan koekappaleiden valmistusvaiheessa säilytyslämpötilana tulee jokaisessa vaiheessa olla  $(20 \pm 2)$  °C, mutta helteiden vuoksi kosteuskaa-

pin lämpötila nousi ajoittain yli sallitun. Suurin havaittu lämpötila kosteuskäpissa oli 23,8 °C. Myös kosteuspitoisuus muuttui kesän vaikutuksesta, ja suurin mitattu ilman suhteellinen kosteus oli peräti 79,8 % RH. Lämpötilan alentamiseksi ei tarvittu erillisiä toimenpiteitä, mutta suhteellisen kosteuden vuoksi kosteuskäppiin jouduttiin vaihtamaan astia, jonka sisältämä suola laski kosteuspitoisuuden sallitulle alueelle.

Koekäppaleiden säilytysvaiheita on esillä kuvassa 4.1. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy koekäppaleita alkusäilytyksessä säilytysammion sisällä (95 ± 5) % RH suhteellisessa kosteudessa. Suhteellinen kosteus saatiin aikaan pitämällä sammion pohjalla vettä ja asettamalla sammion päälle raskas kansi. Koekäppaleet olivat ritilöillä veden yläpuolella. Taka-alalla olevat koekäppaleet ovat vastavalettuja ja kelmujen alla suojassa; etualalla koekäppaleet ovat valmiita siirtymään kosteuskäppiin. Pyöreät koekäppaleet käyvät FOX50-laitteeseen ja isot neliöt FOX304-laitteeseen. Koekäppaleiden pinnat hiottiin vielä ennen mittauksia.



**Kuva 4.1.** Koekäppaleita alkusäilytyksessä sammiossa ja kosteuskäpissa.

Kuvan 4.1 oikeanpuoleisessa kuvassa koekäppaleet ovat kosteuskäpissa, jossa ylläpidettiin haluttua suhteellista kosteutta. Kosteuskäpissa haluttu suhteellinen kosteus saatiin aikaan kylläisen suolaliuoksen avulla. Suola-astian päällä oleva tuuletin varmisti, että kosteus oli sama joka puolella huonetta.<sup>[13]</sup>

Tässä työssä ilman suhteellista kosteutta ja kosteuskäpin lämpötilaa seurattiin kahdella eri T/RH-mittarilla: tietokoneeseen kiinnitetyllä ja käsikäyttöisellä. Tietokoneeseen kiinnitettynä T/RH-mittarina oli Vaisalan HMP 233, jonka suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus on ± 2,0 % RH ja lämpötilan tarkkuus ± 0,1 °C (20 °C) ± 0,005 °C/°C<sup>[13]</sup>. Käsikäyttöisenä T/RH-mittarina toimi Rotronic HygroLog HL-NT3, jonka suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus on valmistajan mukaan ± 1,5 % RH ja lämpötilan tarkkuus ± 0,2 °C<sup>[29]</sup>. T/RH-mittareiden lukemat poikkesivat hieman toisistaan siten, että tietokoneeseen kiinnitetty T/RH-mittari antoi noin yhden yksikön alemman suhteellisen kosteuden ja puolitoista yksikköä korkeamman lämpötilan kuin käsikäyttöinen.

## 4.2 Mittausmenetelmän valinta

### 4.2.1 Mittausmenetelmävaihtoehdot ja mittausolot

Lämmönjohtavuusmittauksien aluksi selvitettiin, mitä menetelmää kokeissa tuli käyttää, sillä kaikki menetelmät eivät sovellu kaikille tuotteille muun muassa koekappaleiden erilaisten pintojen vuoksi. Tässä työssä lopullinen mittausmenetelmä valikoitui koemittauksen perusteella. Tutkittavia vaihtoehtoja olivat koekappaleet kumilevyjen kanssa, koekappaleet termolangoilla, kumilevyjen ja termolankojen yhdistelmä sekä two-thickness-menetelmä sellaisenaan ja two-thickness-menetelmä termolangoilla. Lämmönjohtavuustarkastelu tehtiin myös pelkille kappaleille ilman lisäyksiä, jotta saatiin vertailukohta. Mittausmenetelmävaihtoehtoja oli siis kuusi. Kumilevyjä ei käytetty two-thickness-mittauksissa, sillä kumilevyjen vaikutusta tuloksissa ei kyetty eliminoimaan.

Kaikissa mittauksissa levyjen keskilämpötilaksi valittiin standardin SFS-EN 12667 (2001) ohjeistuksessa esitetty  $10\text{ °C}$  <sup>[11]</sup>, mikä tarkoittaa tavallisissa mittauksissa, että ylälevylle asetetaan lämpötilaksi  $20\text{ °C}$  ja alalevylle  $0\text{ °C}$ . Lämpötilasuositus on sama standardissa SFS-EN 12664 (2001) <sup>[15]</sup>. Termolankoja käytettäessä noudatettiin valmistajan ohjetta ja mittauslämpötilojen ero oli hieman suurempi: pääasiassa ylälevy oli  $23\text{ °C}$  ja alalevy  $-3\text{ °C}$ . Lämpövirran suunta oli alaspäin.

Koemittauksissa hyödynnettiin kahta neljästä tuotteesta, joiden koekappaleet olivat valmiina aikaisemmin. Neljä valmista tuotetta olivat Kiilto 70, Kiilto Superfix DF, Kiilto OTR ja Kiilto OT Light, joista valittiin pintojen perusteella Superfix DF (raekoko enintään 0,5 mm) ja OT Light (2 mm).



**Kuva 4.2.** Pintojen eroavaisuudet. Vasemmalla Kiilto Superfix DF, oikealla Kiilto OT Light. Kuvat on otettu hionnan jälkeen.

Kuten kuvassa 4.2 näkyy, Superfix DF -laastin pinta saatiin hiottua tasaiseksi, mutta OT Light jäi rosoiseksi. Kuvassa Superfix DF -laastin pinnalla näkyvät tummemmat kohdat eivät ole kuoppia, vaan laastissa olevia, hioutuneita hiekanjyviä. OT Light -laastin pintaa hiottaessa hiekanjyvät puolestaan irtosivat, mikä aiheutti uusia kuoppia, ja lopullinen pinta jäi epätasaiseksi. Pintojen erilaisuus takasi sen, että saatuja tuloksia voidaan soveltaa laajasti muihinkin koekappaleisiin pinnan laadun eroista huolimatta.

Mittausmenetelmistä epäilyjä aiheutti ennakoon termolankojen käyttö, sillä laite sulkee ylä- ja alapuoleiset sylinterit nopeasti yhteen suurella voimalla eikä lankojen

pysymistä paikoillaan voida jälkikäteen tarkistaa. Ongelma ratkaistiin laittamalla lankojen päälle läpinäkyvät teipinpalat, jotka pitivät langat paikoillaan. Termolangan kiinnitys koekappaleen yläpintaan tehtyyn uraan näkyy kuvassa 4.3.



**Kuva 4.3.** Termolangan kiinnitys uraan teipeillä. Kuvassa Kiilto Superfix DF.

Teippien osuutta mittaustuloksiin selvitettiin mittaamalla Superfix DF -koekappale sekä teipillisenä että teipittömänä. Tulosten ero mahtui virhemarginaaliin, mutta vaikutuksen vähäisyys varmistettiin vielä OT Light -laastin vastaavalla mittauksella, jossa teippien mahdollisesti aiheuttama virhe todettiin mitättömäksi. Urasyvyys mitattiin koekappaleen molemmilta reunoilta työntömitalla.

#### 4.2.2 Mittausmenetelmän valintakokeet

Koemittauksissa saatiin kuvaajat 4.4 ja 4.5. Kuvissa esiintyvät lyhenteet  $p_1$ - $o_3$  ovat eri koekappaleiden nimiä, missä p viittaa paksuun ja o ohueen koekappaleeseen. Yhdistelmät p+o viittaavat koekappalepareihin, joita on käytetty two-thickness-mittauksissa. Molempien laastien koemittaustulokset löytyvät kokonaisuudessaan liitteestä 2.

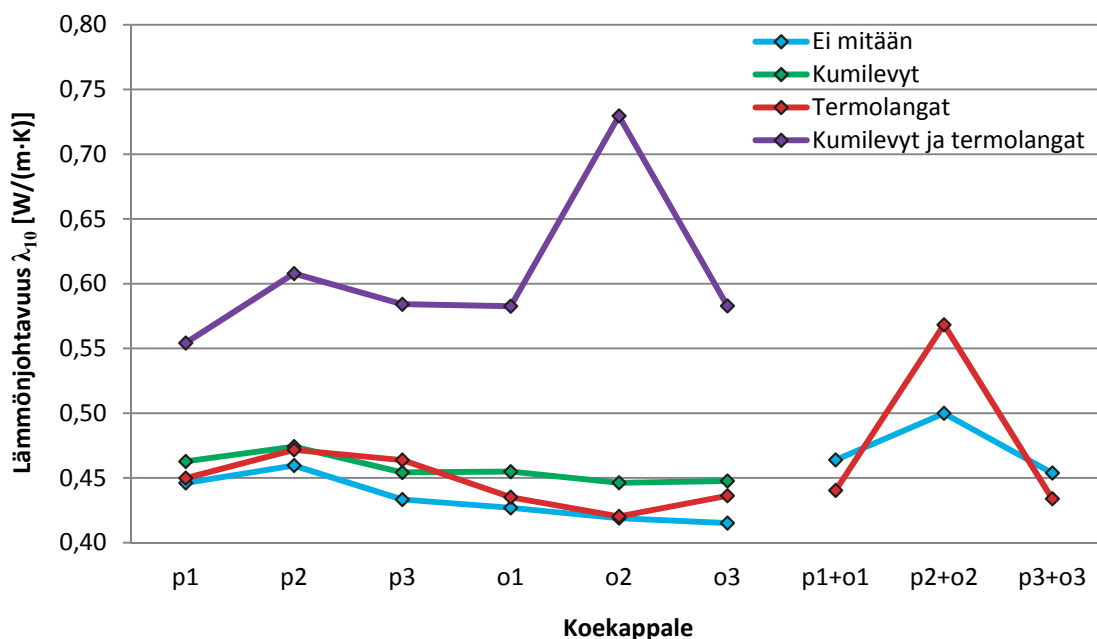
Taulukoista 4.2 ja 4.3 voidaan lukea mittausarvot lasketut keskihajonnat. Keskihajonta on tunnusluku, joka kuvaa mittaustulosten ryhmittymistä keskiarvon ympärille. Mitä pienempi keskihajonta on, sitä lähempänä toisiaan mittaustulokset ovat. Koko otoksen keskihajonta lasketaan yhtälöllä 4.1.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.1)$$

Yhtälön  $x_i$  on tarkasteltava muuttuja,  $\bar{x}$  muuttujien keskiarvo ja  $n$  otoksen koekappaleiden lukumäärä. Hajonta voidaan laskea myös osapopulaatiolle, jolloin yhtälön nimittäjään tulee  $n-1$ . Tuloksissa keskihajonta laskettiin yhtälöllä 4.1 riippumatta siitä, jätettiinkö jokin tai jotkin mittaustulokset huomioon ottamatta.

#### Kiilto Superfix DF

Superfix DF -laastilla tehtyjen koemittausten perusteella saatiin oheinen kuva 4.4 ja taulukko 4.2.



**Kuva 4.4.** Sopivan mittausmenetelmän määrittäminen Superfix DF -laastista tehtyjen koekappaleiden avulla.

**Taulukko 4.2.** Superfix DF -laastilla tehtyjen lämmönjohtavuusmittausten tulokset.

	Paksujen kappa- leiden keskiarvo $\lambda_{\text{mean,paksu}}$ [W/(m·K)]	Ohuiden kappa- leiden keskiarvo $\lambda_{\text{mean,ohut}}$ [W/(m·K)]	Kaikkien kappa- leiden keskiarvo $\lambda_{\text{mean}}$ [W/(m·K)]	Keski- hajonta	Suurimman ja pienimmän ero $\Delta\lambda$ [W/(m·K)]
Ei mitään	0,446	0,420	0,433	0,015	0,045
Two-thickness	-	-	0,473	0,020	0,046
Kumilevyt	0,464	0,450	0,457	0,010	0,028
Termolangat	0,462	0,431	0,446	0,018	0,045
Termolangat (two-th.)	-	-	0,437*	0,003*	0,006*
Kumil. + term.	0,582	0,583*	0,582*	0,017*	0,054*

Kuvan 4.4 ja taulukon 4.2 perusteella voidaan todeta, että Superfix DF -laastin mittaus-tulokset kunkin menetelmän sisällä ovat varsin tasaisia koekappaleiden välillä; vain kumilevy-termolankamittauksissa koekappale o2 ja two-thickness-termolankamittauksen yhdistelmä p2+o2 erottuvat joukoistaan. Nämä jätettiin tarkastelujen ulkopuolelle. Kes-kiarvot ja -hajonnat, joista nämä yksittäiset mittaus-tulokset on poistettu, on merkitty taulukkoon 4.4 tähdellä (\*).

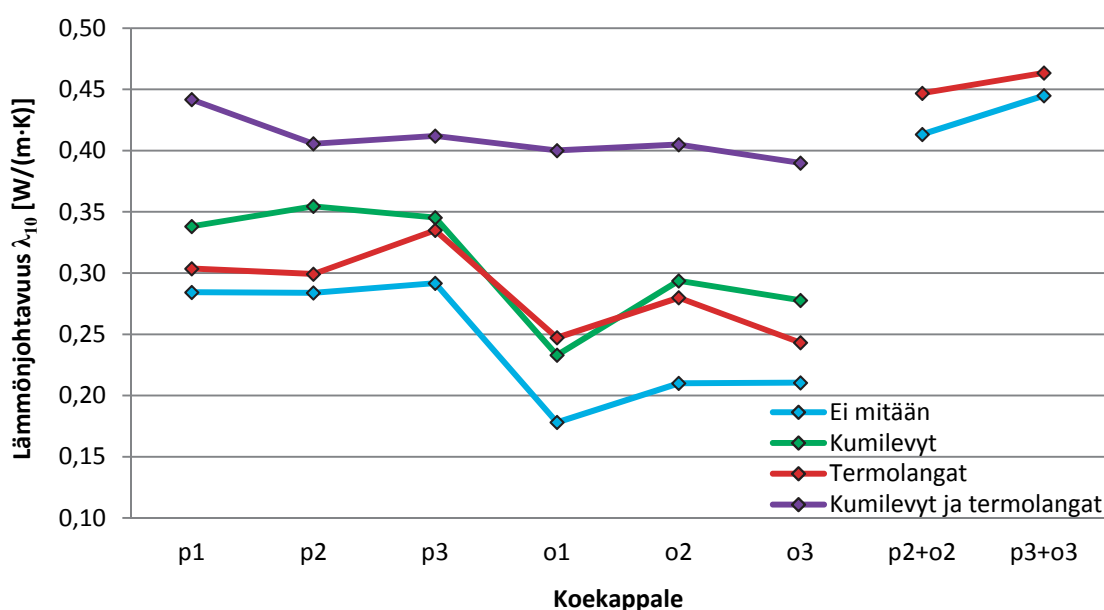
Myös eri mittausmenetelmät antavat keskenään melko samanlaisia tuloksia lukuun ottamatta kumilevy-termolankamenetelmää, joka kulkee muita ylempänä. Se, että pelk-kien kumilevyjen ja pelkkien termolankojen kanssa saadut tulokset ovat lähellä sellaise-naan mitattua koekappaletta, viittaa siihen, että rosoisuutta on vähän. Korkeammat ku-milevy-termolanka-arvot puolestaan kertovat, ettei kaikkia häiriötekijöitä ole aiemmissa mittauksissa saatu kokonaan poistettua. Tällainen häiriötekijä on jokin toistuva virhe, esimerkiksi laitteen levyn lämpötila ei vastaa kappaleen pinnan lämpötilaa tai levyn ja

kappaleen pinnan väliin on jäänyt ilmaa. Kumilevy-termolankayhdistelmä poistaa molemmat mainitut ongelmat.

Kun two-thickness-mittaukset jätetään huomioon ottamatta, saatiin pienin keskihajonta kumilevyymittauksille (0,010) ja suurin termolankamittauksille (0,018). Suurinkin keskihajonnan arvo on pieni, joten mittausten voidaan keskihajonnan perusteella olettaa onnistuneen.

### Kiilto OT Light

OT Light -laastilla tehtyjen koemittausten perusteella saatiin oheinen kuva 4.5 ja taulukko 4.3.



**Kuva 4.5.** Sopivan mittausmenetelmän määrittäminen OT Light -laastista tehtyjen koekappaleiden avulla.

**Taulukko 4.3.** OT Light -laastilla tehtyjen lämmönjohtavuusmittausten tulokset.

	Paksujen kappa- leiden keskiarvo $\lambda_{\text{mean,paksu}}$ [W/(m·K)]	Ohuiden kappa- leiden keskiarvo $\lambda_{\text{mean,ohut}}$ [W/(m·K)]	Kaikkien kappa- leiden keskiarvo $\lambda_{\text{mean}}$ [W/(m·K)]	Keski- hajonta	Suurimman ja pienimmän ero $\Delta\lambda$ [W/(m·K)]
Ei mitään	0,287	0,200	0,243	0,045	0,114
Two-thickness	-	-	0,429*	0,016*	0,032*
Kumilevyt	0,346	0,268	0,307	0,043	0,122
Termolangat	0,322	0,257	0,285	0,032	0,092
Termolangat (two-th.)	-	-	0,455*	0,008*	0,017*
Kumil. + term.	0,420	0,398	0,409	0,016	0,052

Koekappale o<sub>1</sub> halkesi ennen two-thickness-mittauksia, minkä vuoksi yhdistelmä p<sub>1</sub>+o<sub>1</sub> puuttuu. Koekappaleen halkeaminen kesken mittausten viittaa rakenteelliseen vikaan. Keskiarvot ja -hajonnat, joista tämän mittaustulos puuttuu, on merkitty tähdellä (\*).



Odotetusti alhaisin lämmönjohtavuusarvo saatiin mittauksissa pelkällä koekappaleella, sillä menetelmässä korostui ilmarakojen osuus. Kumilevyjen ja termolankojen kanssa lämmönjohtavuus kasvoi, mutta erot paksumpien ja ohuempien koekappaleiden välillä olivat varsin merkittäviä. Syytä ilmiöön ei voitu varmistaa, mutta osasyys laskentatuloksiin lienee kumilevyjen kuvan 3.4 mukainen vaikutus. Sen sijaan kumilevyjen ja termolankojen yhteiskäyttö antoi varsin tasaisia arvoja koekappaleen koosta riippumatta, mikä viittaa siihen, että ilmarakojen määrä on saatu poistettua tai ainakin pieneksi. Nämä arvot olivat myös korkeimpia.

Kumilevy-termolankamittauksia ja two-thickness-mittauksia tarkastellessa on hyvä muistaa, että kumilevy-termolankamittauksia oli kuusi ja two-thickness-menetelmällä tehtyjä kumpaakin vain kaksi. Molemmat two-thickness-mittaukset antavat kuitenkin suhteellisen samansuuruisia tuloksia kuin yksittäiset kumilevy-termolankamittaukset, ja tulokset ovat varsin tasaisia. Superfix DF -laastin tapauksessa sen sijaan two-thickness-mittaukset antoivat matalampia tuloksia kuin kumilevy-termolankamittaukset. Two-thickness-menetelmä on kehitetty erityisesti rosoisille, vaikeasti mitattaville kappaleille. On hyvin mahdollista, että lämpövirtalevylaitteen on vaikeampi saada selville sileän Superfix DF -laastin pieni virhe kuin rosoisen OT Light -laastin selkeä virhe.

Kun two-thickness-mittaukset jätetään huomioon ottamatta, sai pienimmän keskihajonnan kumilevy-termolankamittaus (0,016) ja suurimman pelkät koekappaleet (0,045). OT Light -laastin kohdalla pienin keskihajonta on siis samaa luokkaa kuin Superfix DF -laastin suurin. Kumilevy-termolankamittausten keskihajonnat ovat molemmilla materiaaleilla samaa luokkaa.

Two-thickness-mittauksia tarkastellessa huomataan, että Superfix DF -laastin ja OT Light -laastin mittauksissa pienimmän hajonnan sai kaikista mittauksista two-thickness-termolankamittaus; molemmilla laasteilla siitä myös jätettiin yksi tulos ottamatta huomioon. Pelkistetyn two-thicknessin keskihajonnat ovat melko lähellä toisiaan.

### 4.2.3 Valittu mittausmenetelmä

Mittausmenetelmäksi kaikille laastituotteille valittiin termolankojen ja kumilevyjen yhdistelmä, koska menetelmä antoi tasaisia tuloksia myös huonommille pinnoille.

## 4.3 Varsinaisten mittausten tulokset

Laastien lämmönjohtavuuskokeiden mittaustulokset on koottu taulukkoon 4.4. Tässä työssä mitatut lämmönjohtavuusarvot ovat 10 °C keskilämpötilassa määritettyjä  $\lambda_{10}$ -arvoja. Lämmönjohtavuuksia mitattiin kunkin tuotteen koekappaleista riittävä määrä aritmeettisen keskiarvon  $\lambda_{\text{mean}}$  määrittämiseksi. Vähimmäismittausmäärä lämmönjohtavuuskokeissa määräytyy koekappaleen pinta-alan mukaan, ja FOX50-lämpövirtalevylaitteella tehtävissä lämmönjohtavuuskokeissa vähimmäismäärä on viisi koekappaletta. Jokaisesta laastista oli valettu kuusi koekappaletta. Ellei taulukossa 4.4 ole toisin ilmoitettu (\*), laskelmissa on otettu huomioon kaikki koetulokset. Viidessä tapauksessa yksi mittaustulos hylättiin, mutta tällöin tulos poikkesi merkittävästi muista.

Mittausten hyväksymiselle asetettiin vain yksi kriteeri: paksujen ja ohuiden koekappaleiden lämmönjohtavuuksien keskiarvon ero sai olla korkeintaan 15 %. Raja-arvon ylittäminen johti uusintamittauksiin. Uusintamittauksissa pyrittiin selvittämään, johtui-ko ero eripaksuisten kappaleiden välillä mittausvirheestä vai koekappaleista. Uusintamittausten tarve väheni mittausten edetessä, mikä viittaa siihen, että mittausjärjestelyvirheet vähenivät.

Keskiarvoero vaatimus toteutui muilla paitsi Kiilto 70 Lattiamassalla ja Topplanilla. Näillä kahdella käytetään lämmönjohtavuutena pelkistä paksuista koekappaleista lasket-  
tua keskiarvoa, koska paksujen kappaleiden tuloksia pidettiin ohuiden tuloksia luotetta-  
vampina.

**Taulukko 4.4.** Laastien keskimääräiset lämmönjohtavuusarvot  $\lambda_{mean}$  [ $W/(m \cdot K)$ ] ja kes-  
kihajonnat (mittauskeskilämpötilana 10 °C, materiaalikosteutena (50 ± 10) % RH).  
Raekokotiedot ovat peräisin valmistajalta.

Mittausmenetelmä Materiaali ja enimmäisraekoko			Kumilevyt ja termolangat			
			$\lambda_{mean,paksu}$	$\lambda_{mean,ohut}$	$\lambda_{mean}$	Keskiha- jonta
Lattiatasoitteet	Kiilto 70 Lattiamassa	3 mm	<b>1,97</b>	2,42	2,20	0,27
	Lattialämmitystasoite DF	1 mm	1,42	1,57	<b>1,49</b>	0,14
	Multiplan	1 mm	1,33	1,23 *	<b>1,29</b>	0,05
	Topplan	0,3 mm	<b>0,923</b>	1,14	1,03	0,11
	Tasoflex	0,5 mm	1,12	1,05 *	<b>1,09</b>	0,05
Kiinnityslaastit	Superfix DF	0,5 mm	0,582	0,583 *	<b>0,582</b>	0,02
	Saneerauslaasti	0,5 mm	0,890	0,911	<b>0,900</b>	0,03
	Lattialaasti DF	0,5 mm	0,682	0,764	<b>0,723</b>	0,04
	Highflex S2	0,3 mm	0,447	0,440 *	<b>0,444</b>	0,01
Seinätasoitteet	Kiilto SR DF	0,5 mm	0,446	0,394 *	<b>0,425</b>	0,03
	Kiilto OT	3 mm	1,05	1,18	<b>1,11</b>	0,08
	Kiilto OTR	2 mm	0,751	0,809	<b>0,780</b>	0,05
	Kiilto OT Light	2 mm	0,420	0,398	<b>0,409</b>	0,02
	Kiilto KL	1,5 mm	0,606	0,598	<b>0,602</b>	0,06
	Kiilto TT	0,5 mm	0,554	0,625	<b>0,590</b>	0,07
	Kiilto Saumalaasti no. 39	0,2 mm	0,874	0,972	<b>0,923</b>	0,08
Muut	EPS-laasti	ei tied.	0,161	0,157	<b>0,159</b>	0,01
	PCM-laasti	ei tied.	0,344	0,347	<b>0,346</b>	0,01

Kalibrointitiedosto mittauksissa oli joko Vespel tai Pyrex riippuen laastin lämmönjohta-  
vuudesta. Raja-arvona pidettiin mittaustulosta 0,6 W/(m·K), jonka lähellä ei tulosten  
kannalta ollut väliä sillä, kumpaa tiedostoa käytti. EPS-laastin lämmönjohtavuus oli  
puolestaan niin matala, että sillä käytettiin kalibrointitiedostona poikkeuksellisesti  
Perspex-tiedostoa.

Mittaustulokset koekappaleittain löytyvät liitteestä 3.



## 4.4 Tulosten tarkastelu

### 4.4.1 Mittausolot

Suhteellinen kosteus ei pysynyt koekappaleiden esisäilytyksessä aivan haluttuna ( $(50 \pm 10) \% \text{ RH}$ ), sillä ei ole saatavilla suolaa, jolla saadaan  $50 \% \text{ RH}$  suhteellinen kosteus. Suolana päädyttiin käyttämään magnesiumnitraattia, jolla saa aikaan noin  $54 \% \text{ RH}$  suhteellisen kosteuden. Kesäolosuhteiden vuoksi kosteus kuitenkin vaihteli: alin suhteellinen kosteus mittauksissa oli  $50,4 \% \text{ RH}$  ja korkein  $60,7 \% \text{ RH}$ . Vaihtelua ei pidetty tulosten kannalta merkittävänä.

### 4.4.2 Tutkitut tuotteet

#### Lattiatasoitteet

Lattiatasoitteiden lämmönjohtavuudet vaihtelevat välillä  $1\text{--}2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Lattiatasoitteiden kanssa käytetään usein lattialämmitystä, joten korkeat lämmönjohtavuusarvot ovat toivottuja lämmön tehokkaan siirtymisen aikaansaamiseksi. Lattiatasoitteiden lämmönjohtavuus nousee (ainakin näillä tuotteilla) raekoon kasvaessa.

Seuraavassa on esitetty huomioita kunkin lattiatasoitteen mittauksista. Niistä voidaan todeta, että eniten päänsäivä aiheuttivat ohuet koekappaleet, mihin lieenee syynä näissä lämmönjohtavuusarvoissa ennen kaikkea kuvan 3.4 tilanne. Molemmat laastit, jotka eivät täyttäneet esitettyä kriteeriä paksujen ja ohuiden koekappaleiden välisestä lämmönjohtavuuden enimmäiserosta, olivat lattiatasoitteita.

*Lattiamassa 70* mitattiin kahdesti. Toinen kerta tasoitti mittaustuloksia hieman. Erityisesti ohuempien kappaleiden tulokset vaihtelivat rajusti, minkä vuoksi *Lattiamassa 70:n* tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Tulokset eivät myöskään täyttäneet asetettua kriteeriä, minkä vuoksi lämmönjohtavuutena on käytetty vain paksujen koekappaleiden keskiarvoa.

Myös *Lattialämmitystasointi DF:n* uusittiin kokonaisuudessaan, sillä ensimmäisellä kerralla tulokset vaihtelivat paljon. Uusinnan jälkeen kriteeri täyttyi, vaikka tulokset vaihtelivat kauttaaltaan (kuten keskihajonta osoittaa, ks. taulukko 4.4).

*Multiplanin* kohdalla uusittiin koekappaleen  $o_3$  mittaus, sillä epäiltiin mittausjärjestelyvirhettä. Toisella kerralla tulos oli muiden mukainen. Koekappale  $o_1$  uusittiin myös, mutta sen arvo ei juuri muuttunut alkuperäisestä, joten vian arveltiin johtuvan virheellisestä koekappaleesta ja sen tulos jätettiin lämmönjohtavuuslaskennan ulkopuolelle.

*Topplanin* ensimmäisen mittauksen tulokset vaihtelivat paljon. Uusinta ei tuonut muutosta. *Topplanilla* ohuiden koekappaleiden mittaustulokset olivat järjestelmällisesti korkeampia kuin paksuilla, minkä vuoksi lämmönjohtavuutena on käytetty pelkkien paksujen koekappaleiden keskiarvoa.

*Tasoflexin* koekappaleen  $o_1$  mittaustulosta ei otettu huomioon, koska se poikkesi selkeästi muista.

## Kiinnityslaastit

Tutkittujen kiinnityslaastien lämmönjohtavuudet vaihtelevat välillä 0,44–0,9 W/(m·K) siten, että lämmönjohtavuudet nousevat tuotteesta riippuen noin 0,15 W/(m·K) välein. Nousutasaisuus oli sattumaa.

Kiinnityslaasteilla raekoon ja lämmönjohtavuuden yhteydestä ei voida tehdä arviota lattiatasoitteiden tapaan, koska raekokoerot olivat hyvin pieniä.

Seuraavassa on esitetty huomioita kiinnityslaastien mittauksista. Kahdelta laastilta jouduttiin jättämään yksi mittaustulos huomioon ottamatta. Lattialaasti DF -laastia lukuun ottamatta mittaukset kuitenkin onnistuivat varsin helposti.

*Superfix DF* on toinen koemenetelmän valintamittauksissa olleista materiaaleista. Mittauksissa siltä hylättiin koekappale o<sub>2</sub>, koska sen tulos poikkesi selvästi muista. *Sanee-rauslaasti* ja *Highflex S2* saivat hyväksyttävät tulokset ensimmäisellä mittauskerralla. Tosin Highflex S2 -laastin koekappale o<sub>3</sub> meni vanerimuotista irrotettaessa rikki eikä sitä voitu mitata lainkaan.

Kiinnityslaasteista eniten ongelmia oli *Lattialaasti DF* -laastilla, jolle saatiin eri lämmönjohtavuuden arvot paksuille ja ohuille koekappaleille. Koekappaleiden o<sub>1</sub>-o<sub>3</sub> mittaukset uusittiin, minkä jälkeen asetettu kriteeri täyttyi.

## Seinätasoitteet

Tutkittujen seinätasoitteiden lämmönjohtavuudet ovat välillä 0,4–1,1 W/(m·K). Vertailtaessa taulukossa olevia kolmea OT-laastia (OT Light, OTR ja OT) havaitaan, että raekoon ja lämmönjohtavuuden välillä on jonkinasteinen yhteys.

Seuraavassa on huomioita seinätasoitteiden mittauksista. Ne onnistuivat pääasiassa kerralla, ja vain yhdestä hylättiin mittaustulos.

Laastien *SR DF*, *OTR*, *OT Light* ja *TT* mittaustulokset onnistuivat kerralla. *SR DF*:n koekappaleen o<sub>3</sub> tulos jätettiin laskelmien ulkopuolelle; muilla laasteilla otettiin huomioon kaikki mittaustulokset.

*KL*-laastilla uusittiin mittaukset o<sub>1</sub> ja o<sub>2</sub>, *OT*-laastilla kaikki ohuet kappaleet, ja *Saumauslaasti no. 39* -laastilla o<sub>2</sub> ja o<sub>3</sub>, ennen kuin laastit täyttivät asetetun kriteerin. Yhtään uusinnan mittaustulosta ei tarvinnut hylätä.

## Muut laastit

Luokan ”Muut” mittaukset onnistuivat ensimmäisellä kerralla ilman ongelmia.

*EPS*-laasti sisältää pieniä EPS-palloja, jotka laskevat laastin lämmönjohtavuuden muita mittauksissa olleita laasteja alemmalle tasolle. *EPS*-laastin lämmönjohtavuus ylittää kuitenkin selvästi *EPS*-eristeen kirjallisuusarvon 0,033–0,041 W/(m·K) <sup>[9]</sup>.

*PCM*-laasti on käytännössä faasimuutosmateriaaleja sisältävää *KL*-laastia. *PCM*-laastissa faasimuutos tapahtuu vasta 20–30 °C välillä, mutta kuten taulukosta 4.4 nähdään, *PCM*-laastin lämmönjohtavuus on jo lähtötilanteessa 10 °C lämpötilassa noin

0,26 W/(m·K) alhaisempi kuin KL-laastilla. Faasimuutosmateriaalin on todettu jossain määrin lisäävän huokoisuutta, mikä osittain selittää laastien lämmönjohtavuusarvojen välisen eron. Muita merkittäviä tekijöitä ovat mikrokapseleiden muita ainesosia alhaisempi lämmönjohtavuus ja laastien mahdolliset vesi-sementtisuhde-erot. <sup>[30]</sup> Tarkastelu faasimuutosmateriaalin merkityksestä lämmönjohtavuuteen korkeammilla lämpötiloilla käydään läpi myöhemmässä luvussa 4.5.

#### 4.4.3 Laastien lämmönjohtavuudet kirjallisuudessa

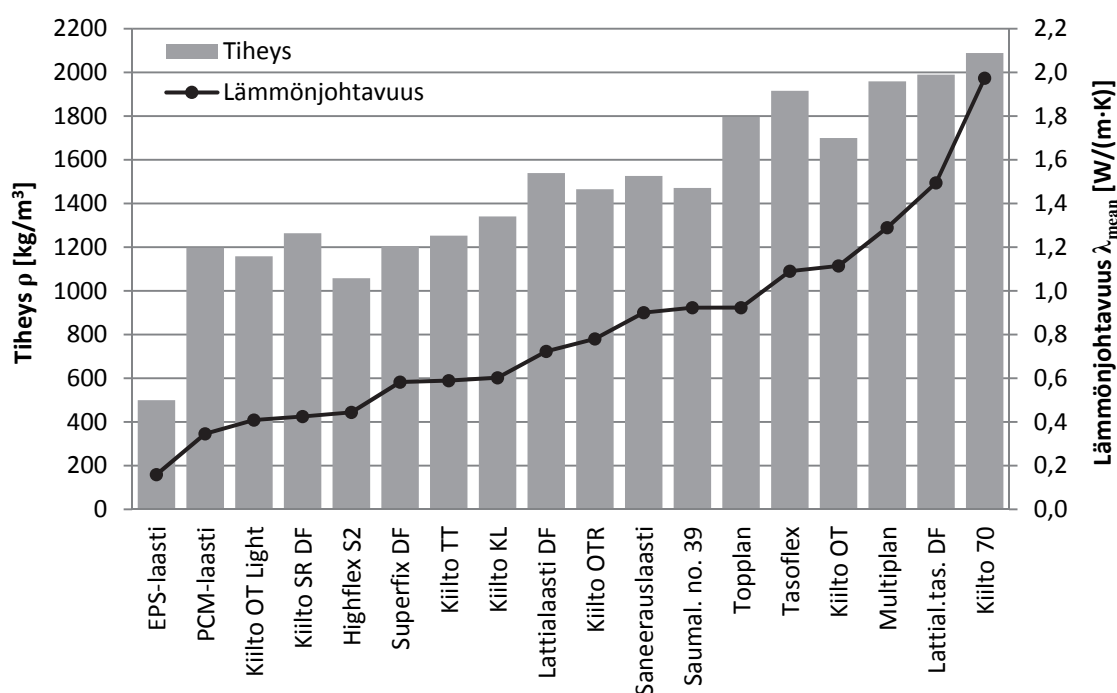
Ulkomaisissa lähteissä laastin lämmönjohtavuudeksi annetaan 0,16–0,80 W/(m·K) riippuen laastityypistä. Esimerkiksi kevytlaastin (tiheys 600 kg/m<sup>3</sup>) lämmönjohtavuudeksi annetaan 0,16 W/(m·K) ja tiiviin laastin (1 300 kg/m<sup>3</sup>) 0,50 W/(m·K). <sup>[31]</sup>

Myös jotkut valmistajat ilmoittavat tuotteidensa mitattuja lämmönjohtavuusarvoja. Esimerkiksi Knauf antaa kahdelle mainitsemalleen kipsipohjaisille seinälaastille arvoksi noin 0,3 W/(m·K) ja lattialaastilleen arvoksi 2 W/(m·K) <sup>[32]</sup>.

Mittauksissa saadut lämmönjohtavuuksien arvot vaihtelevat välillä 0,16–2 W/(m·K), mikä vastaa kirjallisuudessa esitettyjä arvoja kohtuullisen hyvin, kun otetaan huomioon, että laasteissa on paljon eroja ja että laastien lämmönjohtavuusalue on laaja.

#### 4.4.4 Lämmönjohtavuuden ja tiheyden välinen yhteys

Kuten luvussa 3.3.1 todettiin, materiaalin tiheys vaikuttaa lämmönjohtavuuteen. Kuvassa 4.6 laastituotteet on järjestetty lämmönjohtavuuksiensa mukaisesti nousevaan järjestykseen. Pylväät kuvastavat laastin tiheyden keskiarvoa, joka on laskettu kustakin koe-kappaleesta sen halkaisijan, paksuuden (molemmat ± 0,5 mm) ja massan (± 0,1 g) avulla. Lämmönjohtavuudet on kuvattu käyrällä.



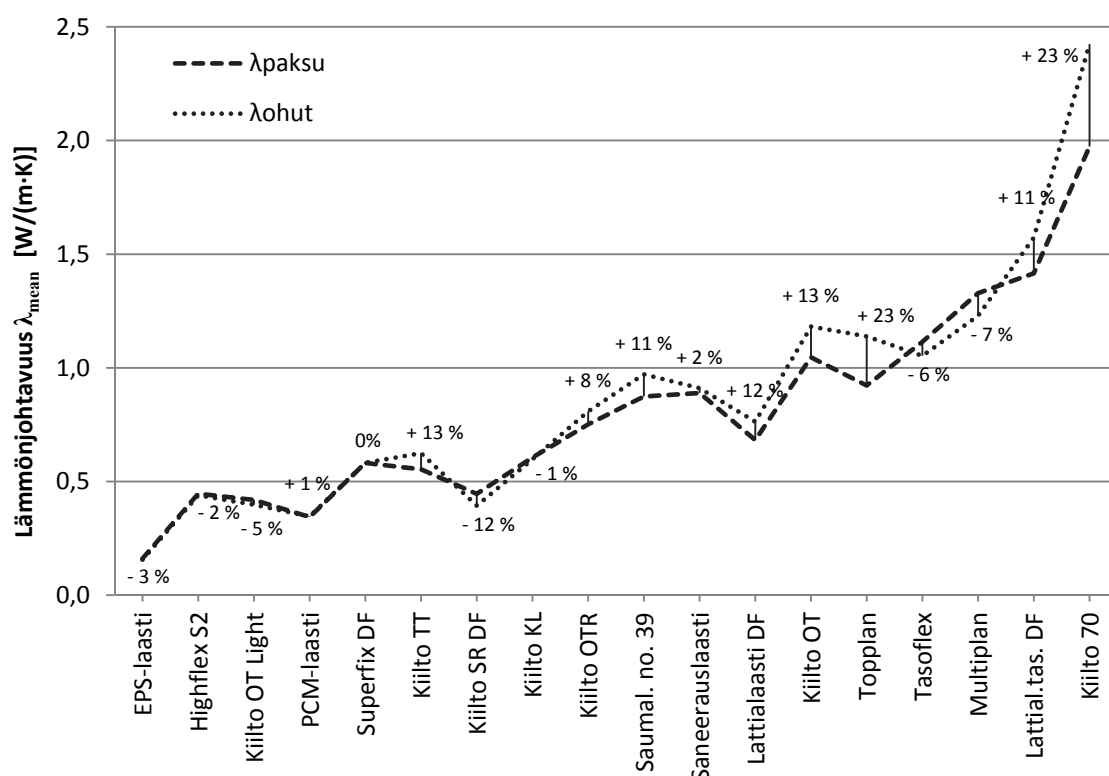
**Kuva 4.6.** Lämmönjohtavuuden ja tiheyden välinen yhteys.

Kuvasta 4.6 nähdään, että vaikka notkahduksia esiintyy, pylväsrivistön yleistrendi on nouseva, eli tiheämmät laastit ovat saaneet mittauksissa korkeampia lämmönjohtavuuksia kuin harvemmat. Myös käyrän ja pylväiden muutoksissa voidaan havaita joitain yhteneväisyyksiä, esimerkiksi Highflexin ja Saneerauslaastin välisten tuotteiden kohdalla.

Huomautus: Koska koekappaleet olivat varsin pieniä sekä mitoiltaan että painoiltaan, tiheysarvoissa saattaa olla eroja valmistajan tietoihin. Poikkeavuutta lisää se, että niillä laasteilla, joilla lisättävä vesimäärä oli ilmoitettu välinä, sekoitettiin laastiin keskiarvon verran vettä. Täten kuvan tiheydet ovat suuntaa-antavia, eivät absoluuttisia.

#### 4.4.5 Paksujen ja ohuiden koekappaleiden erot

Suoritetuissa kokeissa ohuille koekappaleille saatiin pääsääntöisesti suuremmat lämmönjohtavuudet kuin paksuille, ja hylättyjen tulosten joukossa oli vain ohuiden koekappaleiden mittauksia. Paksuuden puolittuessa lämmönjohtavuus nousi keskimäärin 5 %. Myös lämmönjohtavuuden laskua nähtiin. Hyväksyttynä erona pidettiin 15 %, mutta kaikki tuotteet eivät täyttäneet tätä uusintamittauksillakaan. Uusintamittauksen tarkoitus oli poistaa mahdolliset mittauksista aiheutuneet virheet, mutta niillä ei voida vaikuttaa koekappaleissa esiintyviin virheisiin. Paksujen ja ohuiden koekappaleiden lämmönjohtavuuserot on kuvattu oheisessa kuvassa 4.7.



**Kuva 4.7.** Paksujen ja ohuiden koekappaleiden lämmönjohtavuuksien keskiarvojen erot (prosenttiero = ohut/paksu). Laastit on lajiteltu tiheyden mukaan nousevasti.

Kuvassa 4.7 eroja on havainnollistettu lajittelemalla laastit tiheyden mukaan nousevaan järjestykseen, jotta erojen muutokset tiheyden muuttuessa ovat helpommin havaittavissa. Kuvasta nähdään, että suurimmat prosenttierot painottuvat tiheyksien ja mitattujen

lämmönjohtavuuksien yläpäähän. Alimmilla tiheyksillä ohuiden ja paksujen koekappaleiden välinen ero on pieni. Keskisuurilla tiheyksillä ohuiden koekappaleiden lämmönjohtavuus on pääosin paksuja koekappaleita korkeampi.

Kuvasta nähdään, että kaksi tuotetta (Kiilto 70 ja Topplan) ylittivät raja-arvoksi asetetun 15 %. Näillä prosenttiero oli uusintamittaustenkin jälkeen 23 %, minkä vuoksi näiden laastien lämmönjohtavuus määritettiin vain paksujen koekappaleiden tulosten perusteella. Kuudella tuotteella mittaustulosten ero oli 10–15 % ja lopuilla kymmenellä vähemmän kuin 10 %. Kaikista tuotteista seitsemällä ohuet koekappaleet saivat matalammat lämmönjohtavuusarvot kuin paksut koekappaleet, mutta näillä prosenttierot olivat hyväksyttävän suuria.

Osan eripaksuisten koekappaleiden eroista selittää pinnan lämmönvastus, joka mainittiin luvussa 3.4.2. Vaikka paksuus (millimetreinä) olisikin valmistajan ohjeen mukaisesti vähintään kolme kertaa materiaalin lämmönjohtavuus (yksikössä  $W/(m \cdot K)$ ), ohuille koekappaleille syntyvän virheen osuus on silti suurempi kuin paksuilla. Tämän virheen vaikutus lisääntyy korkeamman lämmönjohtavuuden materiaaleilla kuvassa 3.4 esitetyn kumilevyvaikutuksen vuoksi. Myös mahdolliset valuvirheet korostuvat ohuemmissa kappaleissa.

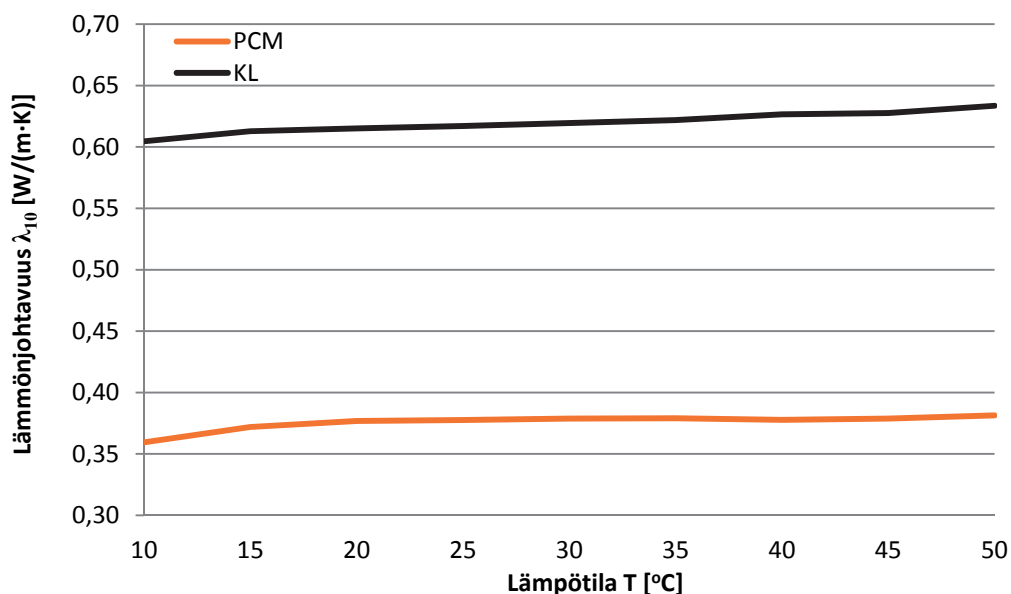
Saatujen mittaustulosten perusteella voidaan suositella, että tulevaisuudessa kumilevyjen kanssa suoritettavissa mittauksissa käytetään ennemmin paksuja kuin ohuita kappaleita.

## 4.5 Faasimuutosmateriaali 10–50 °C lämpötiloissa

Faasimuutosmateriaalin toimintaa tarkasteltiin standardien mukaisen 10 °C lisäksi korkeammilla lämpötiloilla, sillä faasimuutos tapahtuu vasta 20–30 °C välillä. Tehtävänä oli selvittää faasimuutosmateriaalin vaikutus lämmönjohtavuuteen. Koska PCM-laasti on faasimuutosmateriaalia sisältävää KL-laastia, toimi luonnollisena vertailukohtana KL-laasti. Näin mittaustuloksista voitiin päätellä, millainen vaikutus faasimuutosmateriaalin lisäyksellä oli lämmönjohtavuuteen lämpötilan noustessa.

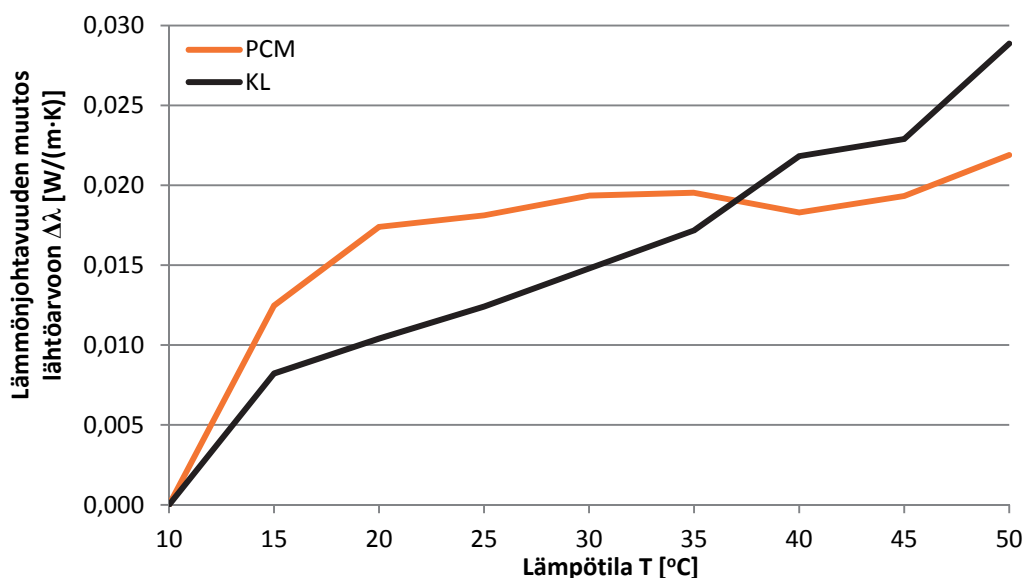
Mittauksiin valikoituivat PCM-laastilta koekappale o<sub>2</sub> ja KL-laastilta p<sub>1</sub>. Koekappaleet mitattiin 5 °C välein keskilämpötiloissa 10–50 °C. Myös kumilevyt mitattiin vastaavissa lämpötiloissa. Mittauslämpötilan enimmäisarvo määräytyi käytettyjen kumilevyjen perusteella, sillä viimeisen mittauslämpötilan ylälevyn arvo oli 60 °C eikä kyseistä kumia saa lämmittää sen yli. Levyjen lämpötilaero oli termolankojen vuoksi 22 °C (p<sub>1</sub> viimeinen mittaustulos, jossa ero oli kumilevyn ylärajan vuoksi 20 °C).

Mittaustulokset on koottu kuvaan 4.8.



**Kuva 4.8.** PCM- ja KL-laastin lämmönjohtavuuden muuttuminen lämpötilan noustessa.

Kuvassa 4.8 eroja on vaikea vertailla niiden pienuuden ja kuvan mittakaavan vuoksi. Jotta tulosten keskinäinen vertaileminen helpottuu, muunnetaan tulokset kuvastamaan muutosta suhteessa kummankin laastin 10 °C lämpötilassa mitattuun lähtöarvoon. Tällöin kuvaajat saadaan lähemmäs toisiaan. Muunnetut mittaustulokset koottiin kuvaan 4.9. Kuvaa tarkastellessa on huomattava, että kyse on erittäin pienistä muutoksista – vain sadas- tai tuhannesosista.



**Kuva 4.9.** PCM- ja KL-laastin lämmönjohtavuuden muutoksen suuruus verrattuna lähtöarvoon lämpötilan noustessa.

Kuvasta 4.9 havaitaan, että alussa PCM-laastin lämmönjohtavuus nousee hieman enemmän kuin KL-laastilla. PCM-laastin alun nousu taittuu kuitenkin jo ennen faasimuutosaluetta. Syynä lienee se, että ainakin toinen levylämpötila on faasimuutosalueella tai sen yli (esimerkiksi keskilämpötilassa 20 °C alalevyn lämpötila on 9 °C ja

ylälevyn 31 °C), mikä aiheuttaa faasimuutosmateriaalin ominaisuuksissa muutoksia. Lämpötilavälin 20–40 °C tasainen kuvaaja tarkoittaa sitä, ettei lämmönjohtavuuden arvo muutu. Lopussa kuvaaja lähtee lievään nousuun. Näitä muutoksia ei juuri voida havaita kuvasta 4.8.

KL-laastin lämmönjohtavuus nousee läpi koko mittausalueen. Lämpötilassa 45 °C oleva notkahdus johtuneen mittausepä-tarkkuudesta. Nousu on varsin tasaista, kun otetaan huomioon mittausten virhemarginaali.

Mittausten perusteella faasimuutosmateriaalin lisäyksellä on vaikutus lämmönjohtavuuden muutoksiin eri lämpötila-alueilla. Taulukosta 4.4 havaitaan, että alkulämpötilassa PCM-laastin lämmönjohtavuus (laskettuna kaikkien mittausten keskiarvona) on 0,26 W/(m·K) alhaisempi kuin KL-laastilla. Faasimuutosalueella faasimuutosmateriaali puolestaan vaikuttaa siten, että lämmönjohtavuus ei muutu lämpötilan noususta huolimatta. Sitä, mitä tapahtuu faasimuutosalueen jälkeen, on yritetty selvittää mittausten viimeisillä lämpötila-arvoilla. Niiden perusteella lämmönjohtavuus lähtee uudestaan nousuun, mutta loivempana kuin KL-laastilla.

## 5 LAASTIEN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTI-MITTAUKSET

### 5.1 Mittausjärjestelyt

Ominaislämpökapasiteettimittauksissa käytettiin FOX50-lämpövirtalevylaitetta, ja koe-kappaleina oli kustakin laastista kaksi paksua kappaletta. Koekappaleet mitattiin sellai-sinaan, sillä kontaktivastuksella ei teorian mukaan ole vaikutusta ominaislämpökapasi-teettiin. Osalla kappaleista muutettiin lämpövirtalevylaitteen PID-kertoimia, mutta muu-toksella ei ole vaikutusta mittaustuloksiin – muutokset vain helpottavat lämpötilan ta-soittumista.

Mittauslämpötiloiksi valittiin laitevalmistajan ohjeiden mukaiset lämpötilat 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C ja 45 °C. Lopullinen tulos ilmoitetaan peräkkäisten mittauspisteiden keskiarvoissa, eli tällä valinnalla ominaislämpökapasiteetti saadaan neljällä eri lämpöti-lalla (10 °C, 20 °C, 30 °C ja 40 °C). Kaikista tuloksista laskettu keskiarvo vastaa 25 °C olevaa arvoa olettaen, että muutos lämpötilan suhteen on tavallisten materiaalien tapaan jokseenkin vakio. Ominaislämpökapasiteetin pitäisi muuttua lämpötilan noustessa niin, että se muodostaa nousevan kuvaajan.

FOX50-laite ilmoittaa ominaislämpökapasiteettiarvot tilavuutta kohden, mutta lo-pulliset tulokset lasketaan massaa kohden. Muunnos tehdään jakamalla arvot materiaa-lin tiheydellä. Tiheytenä käytettiin tutkittujen koekappaleiden tiheyksien keskiarvoa.

### 5.2 Mittaustulokset

Ominaislämpökapasiteettimittausten tulokset on koottu taulukkoon 5.1. Taulukossa esiintyvä tiheys on mitattujen kappaleiden tiheyksien keskiarvo. Ominaislämpökapasi-teetin arvo on pyöristetty viimeisessä sarakkeessa lähimpään 50 J/(kg·K), sillä ominais-lämpökapasiteetti ilmoitetaan yleensä tällä tarkkuudella.

Johtuen rajallisesta ajasta, mittaukset suoritettiin pääasiassa kahdella paksulla koe-kappaleella per laasti. EPS-laastilla käytettiin ohuita kappaleita, sillä lämmöneristekap-paleiden enimmäispaksuus on 10 mm (ks. 3.4.2). Mikäli välituloksissa on esiintynyt yksittäisiä poikkeuksia, on nämä mittaukset uusittu. Mittaustulokset löytyvät kokonai-suudessaan liitteestä 4.



**Taulukko 5.1.** Laastituotteiden ominaislämpökapasiteetit lämpötilassa 25 °C. Tiheytenä on käytetty tutkittujen koekappaleiden tiheyden keskiarvoa.

Tuote	Tiheys $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Ominaislämpö- kap. $c_p$ [J/(m <sup>3</sup> ·K)]	Ominaislämpö- kap. $c_p$ [J/(kg·K)]	Pyöristetty ominais- lämpökap. $c_p$ [J/(kg·K)]
Kiilto 70	2 125	1 950 439	918	<b>900</b>
Lattialämm.tas. DF	2 073	1 973 425	952	<b>950</b>
Multiplan	2 002	2 020 917	1 009	<b>1 000</b>
Topplan	1 773	1 914 849	1 080	<b>1 100</b>
Tasoflex	1 928	2 059 497	1 068	<b>1 050</b>
Superfix DF	1 238	1 374 400	1 111	<b>1 100</b>
Saneerauslaasti	1 528	1 747 471	1 144	<b>1 150</b>
Lattialaasti DF	1 568	1 681 050	1 072	<b>1 050</b>
Highflex S2	1 048	1 435 465	1 370	<b>1 350</b>
Kiilto SR DF	1 284	1 314 457	1 024	<b>1 000</b>
Kiilto OT	1 707	1 483 734	869	<b>850</b>
Kiilto OTR	1 490	1 254 316	842	<b>850</b>
Kiilto OT Light	1 181	967 774	819	<b>800</b>
Kiilto KL	1 316	1 134 701	862	<b>850</b>
Kiilto TT	1 232	1 043 123	846	<b>850</b>
Saumalaasti no. 39	1 515	1 873 848	1 237	<b>1 250</b>
EPS-laasti	472	505 690	1 070	<b>1 050</b>
PCM-laasti	1 192	1 366 813	1 147	<b>1 150</b>

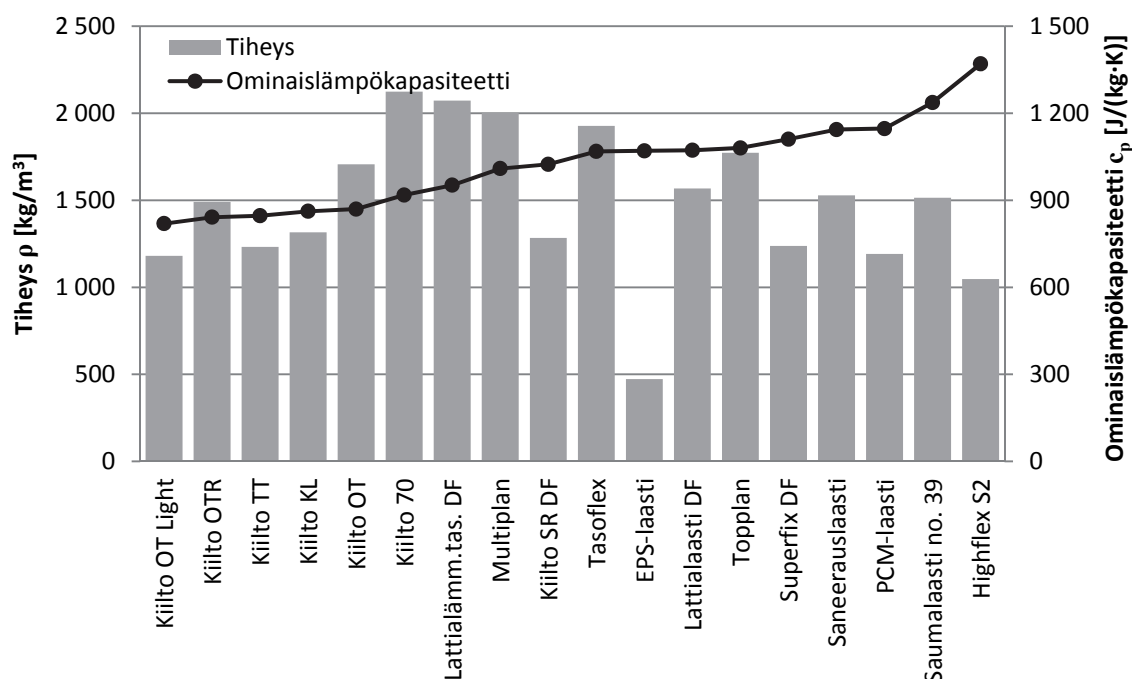
## 5.3 Tulosten tarkastelu

### 5.3.1 Tutkitut tuotteet

Tiheydellä jaetut ominaislämpökapasiteetit vaihtelevat 819 J/(kg·K) ja 1 370 J/(kg·K) välillä. Kaikkien mittausten keskiarvo on 1 014 J/(kg·K). Laastit, joiden kiviaineksen enimmäisraekoko oli millimetrin tai suurempi, saivat keskiarvokseen 896 J/(kg·K) ja pienemmän raekoon laastit 1 106 J/(kg·K). Korkeimmat arvot saatiin laasteille, joiden aines on liitumaisen hienoa. Mainituissa keskiarvoissa ei ole mukana EPS- tai PCM-laastia.

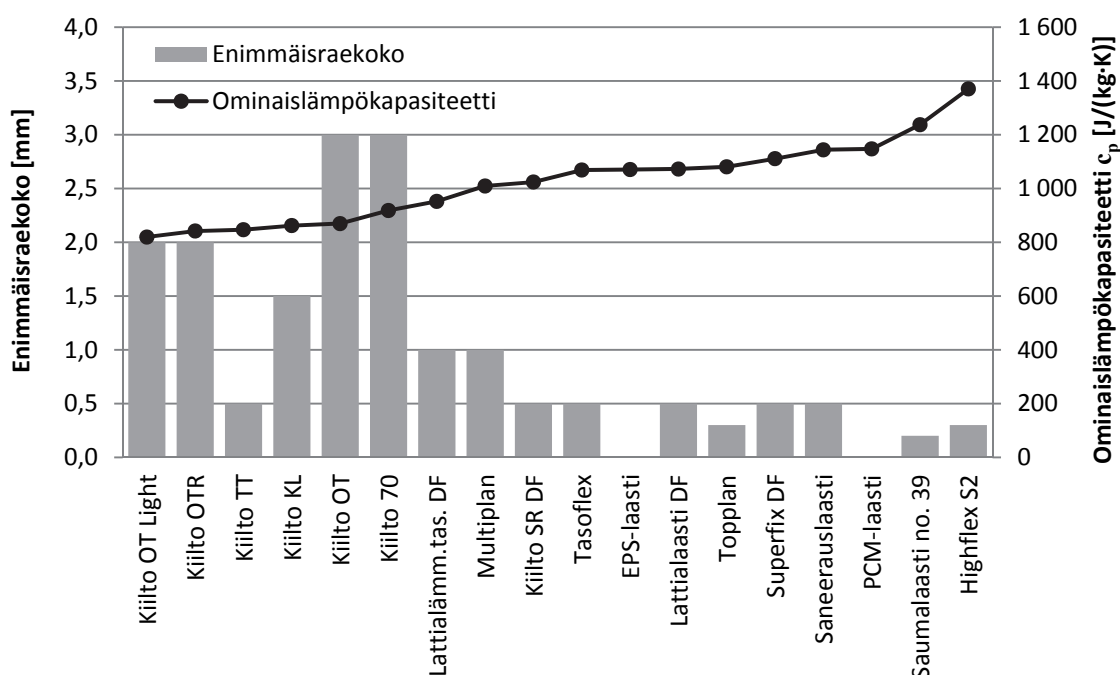
Koekappaleiden välinen ero oli neljää laastia lukuun ottamatta laitteelle ilmoitetun mittaustarkkuuden (5 %) sisällä. Suurin ero (10 %) oli KL-laastilla, jonka rakenne on varsin hiekkainen. Muut laastit, joiden mittaustuloksissa oli suuria eroja, olivat Saneerauslaasti, OT-laasti ja EPS-laasti. Viiden prosentin tarkkuus suuruusluokassa 1 000 J/(kg·K) tarkoittaa 50 J/(kg·K).

Tutkittujen laastien ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden välillä ei ole samanlaista yhteyttä kuin mitä oli lämmönjohtavuuden ja tiheyden välillä. Yhteyden puuttuminen on havainnollistettu kuvassa 5.1, jossa tuotteet on lajiteltu ominaislämpökapasiteetin mukaan nousevasti. Kuvasta nähdään, etteivät tiheyden arvot muutu ominaislämpökapasiteetin arvon mukana, vaan ne vaihtelevat epäjohdonmukaisesti.



**Kuva 5.1.** Ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden välinen yhteys.

Sen sijaan laastin ominaislämpökapasiteetin ja kiviaineksen enimmäisraekokoon välillä löytyy yhteys, kuten kuvasta 5.2 näkyy. Pääasiassa sellaiset laastit, joiden raekoko on pieni, sijoittuvat saatujen ominaislämpökapasiteettiarvojen yläpäähän ja suuren raekoon tuotteet vastaavasti alapäähän. Erot laastien arvoissa esimerkiksi keskivaiheella (Tasoflex–Topplan) ovat tosin niin pieniä, että laastien järjestys näillä alueilla on mittaus-tarkkuuden vuoksi epävarma. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä päätelmään raekoon ja ominaislämpökapasiteetin välisestä yhteydestä.



**Kuva 5.2.** Ominaislämpökapasiteetin ja raekoon välinen yhteys. EPS- ja PCM-laastin kiviaineksen enimmäisraekoko ei ole tiedossa.

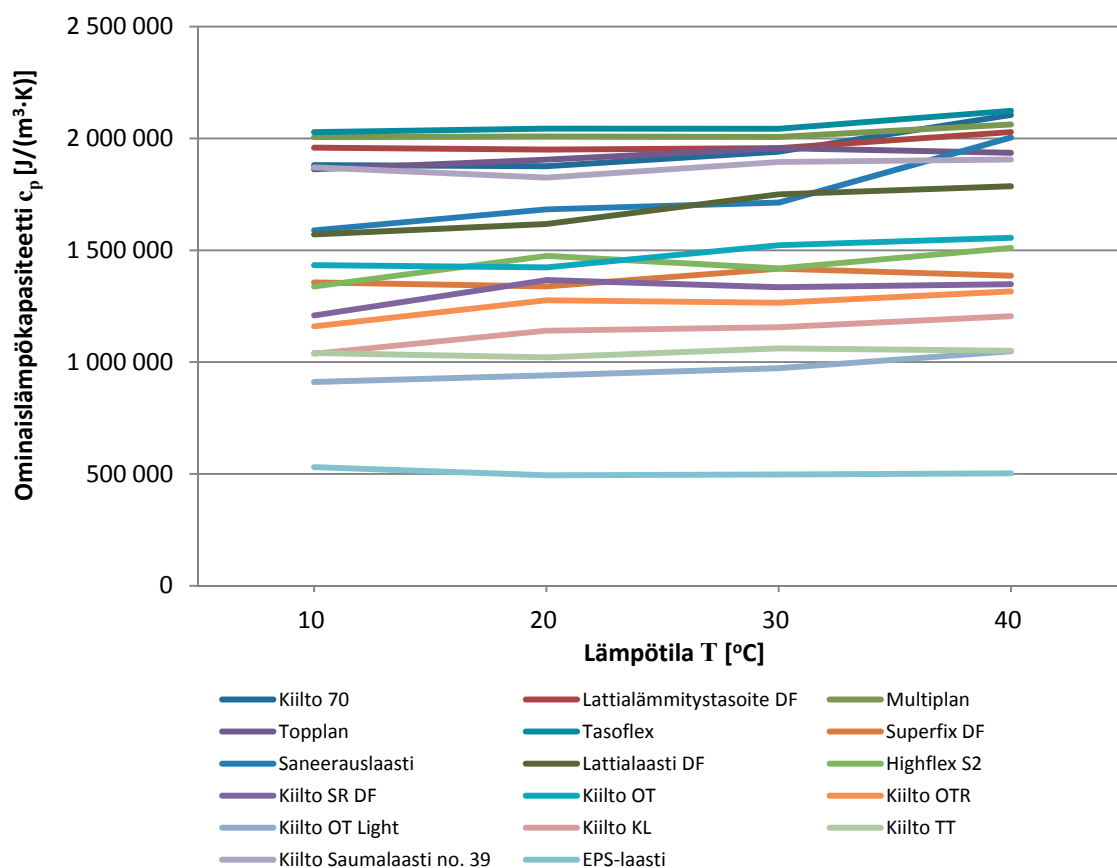
### 5.3.2 Laastien ominaislämpökapasiteetit kirjallisuudessa

Kirjallisuudessa kevytlaastin ominaislämpökapasiteetiksi ilmoitetaan 1 000 J/(kg·K) ja hiekkaisen laastin arvoksi 900 J/(kg·K). Yhtenä syynä hiekkaisen laastin alempaan arvoon on kiviaineksen muita laastimateriaaleja pienempi ominaislämpökapasiteetti. [33] Muita arvoja löytyy yksittäisille tuotteille.

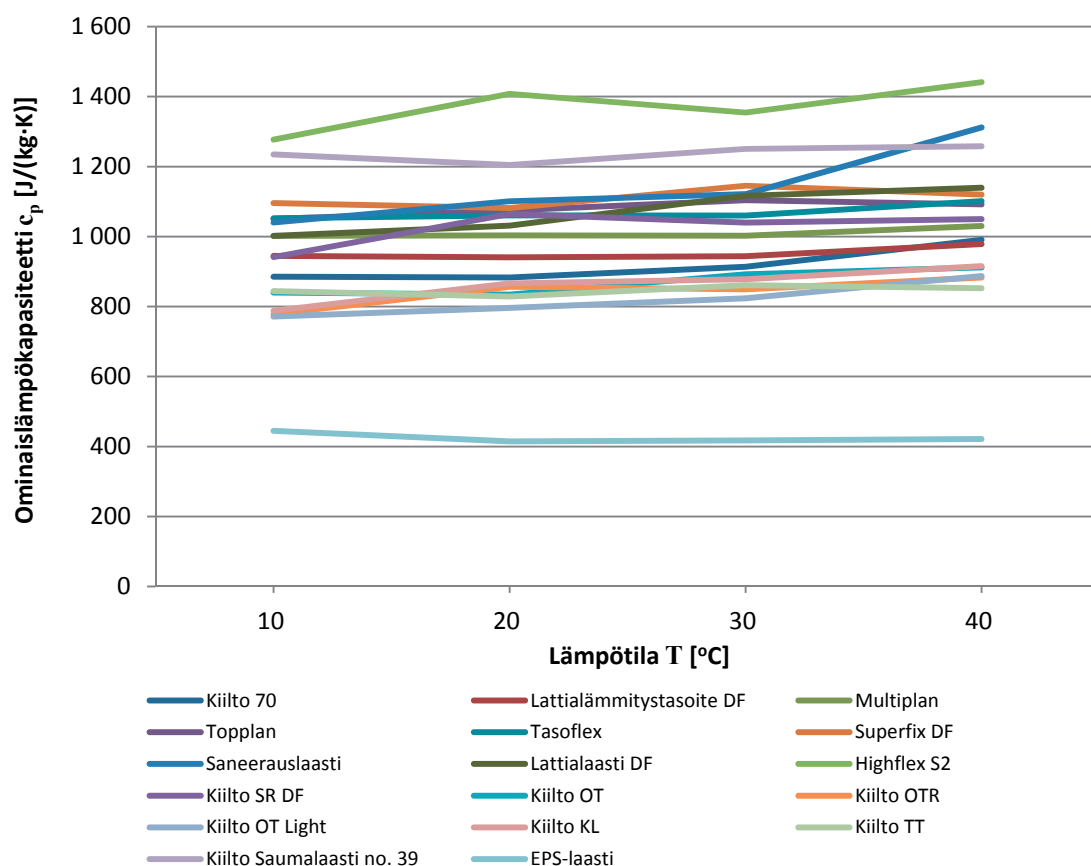
Mittauksissa saadut arvot vastaavat kirjallisuusarvoja, kun otetaan huomioon laastien keskinäinen vaihtelevuus ja lämpövirtalevylaitteen mittaustarkkuus. Laitteen antaman mittausarvon jakaminen pienistä kappaleista määritetyllä tiheydellä saattaa lisätä tiheydellä jaetun arvon epätarkkuutta. Mainituista tekijöistä huolimatta kirjallisuus- ja mittausarvot ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### 5.3.3 Mittauslämpötilan vaikutus mittausarvoihin

Lämpötilan nousu aiheuttaa teorian mukaan ominaislämpökapasiteetin arvon kasvua, eli mittauksissa pitäisi saada aikaan nouseva kuvaaja. Nousun suuruus voi vaihdella eri laastien välillä. Kuvassa 5.3 on esitetty suoritetuista mittauksista saadut arvot. Kukin kuvassa esitetty ominaislämpökapasiteetin arvo on kahden (EPS-laastin tapauksessa kolmen) eri mittauksen keskiarvo eikä arvoa ole jaettu koekappaleiden tiheydellä. Tiheydellä jaettu arvo on kuvassa 5.4.



**Kuva 5.3.** Mitatun ominaislämpökapasiteetin muuttuminen lämpötilan noustessa. Kuvasta puuttuu PCM-laasti, jota käsitellään erikseen luvussa 5.3.4.



**Kuva 5.4.** Tiheydellä jaetun ominaislämpökapasiteetin muuttuminen lämpötilan noustessa. Kuvasta puuttuu PCM-laasti, jota käsitellään erikseen luvussa 5.3.4.

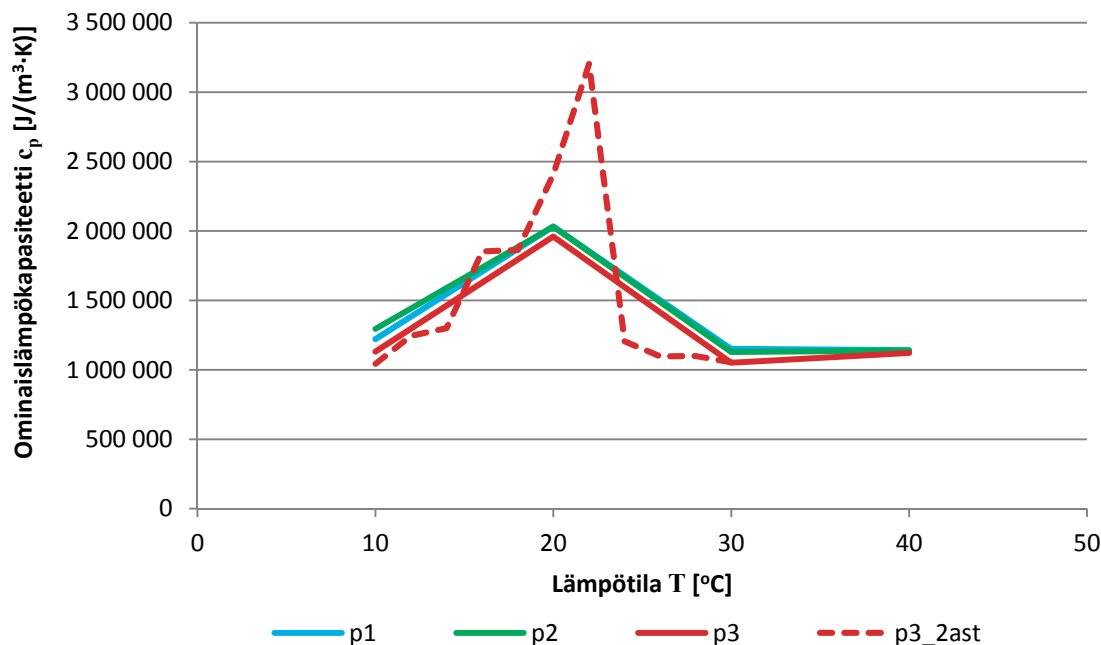
Kuvassa 5.3 esitetty tilavuutta kohden ilmoitettu ominaislämpökapasiteetti on pääasiassa  $1\,000\,000$ – $2\,000\,000$  J/(m<sup>3</sup>·K). EPS-laasti on saanut selvästi muita laasteja alemmat arvot (noin  $500\,000$  J/(m<sup>3</sup>·K)). Korkeimmat mittaustulokset saatiin lattiatasotteille, jotka erottuvat omaksi ryhmäkseen. Kuvassa 5.4 tiheydellä jaettujen ominaislämpökapasiteettien kuvaajien muoto on sama kuin kuvassa 5.3, mutta laastien järjestys on muuttunut. Se, missä yksikössä tarkastelu tapahtuu, vaikuttaa järjestykseen, mutta ei kuvaajien muotoon.

Kuvien 5.3 ja 5.4 kuvaajista nähdään, että ominaislämpökapasiteetit ovat maltillisesti nousevia. Vain Saneerauslaastin arvo nousee yli 20 % lähtöarvostaan. Lopuilla laasteilla keskimääräinen nousu on 8 %. Mittausarvon muuttuminen on suurimmalla osalla laasteista kutakuinkin vakio, vaikka joitain notkahduksia ja kulmanmuutoksia on havaittavissa. Highflex S2 -laastin kuvaaja kulkee kuvassa 5.4 ylimpänä ja siinä on selvin heilahtelu. PID-kertoimien muutoksilla mitatut laastit eivät erotu oletusarvoilla mitatuista.

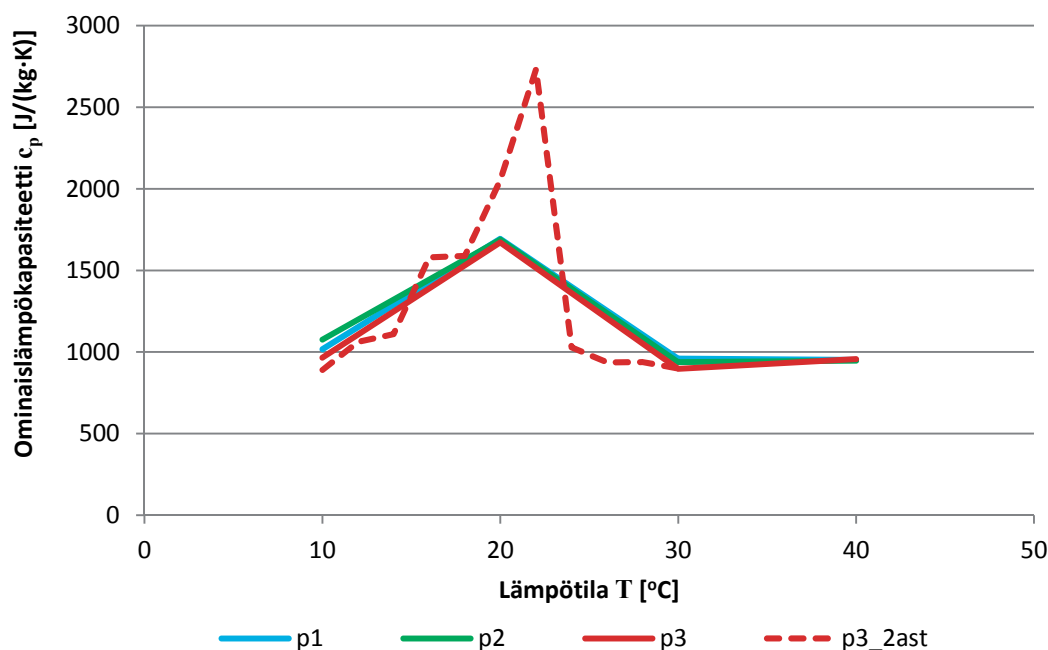
### 5.3.4 PCM-laasti

PCM-laastin ominaislämpökapasiteettimittauksissa mitattiin kolme paksua koekappaletta samoissa lämpötiloissa kuin missä muutkin laastit on mitattu. PID-kertoimia muutettiin näissä mittauksissa. PCM-laastille saatu ominaislämpökapasiteetin muuttuminen

lämpötilan muuttuessa on esitetty koekappaleittain kuvassa 5.5. Ohjelämpötilojen lisäksi kappale p<sub>3</sub> mitattiin 2 °C välein lämpötiloissa 10–30 °C (mittauslämpötilat 9 °C, 11 °C, 13 °C...31 °C). Kuvan 5.5 katkoviiva esittää 2 °C välein mitattuja arvoja, ja kyseiset mittausarvot on esitetty taulukossa 5.2. Tiheydellä jaetut mittausarvot on esitetty kuvassa 5.5 ja taulukossa 5.3.



**Kuva 5.5.** PCM-laastin ominaislämpökapasiteetin mittaustulokset paksuilla koekappaleilla. Jatkuvat kuvaajat ovat oletuslämpötiloissa saatujen tulosten kuvaajat ja katkoviiva on 2 °C välein mitattujen arvojen kuvaaja koekappaleelle p<sub>3</sub>.



**Kuva 5.6.** PCM-laastin ominaislämpökapasiteetin tiheydellä jaetut tulokset paksuilla koekappaleilla. Jatkuvat kuvaajat ovat oletuslämpötiloissa saatujen tulosten kuvaajat ja katkoviiva on 2 °C välein mitattujen arvojen kuvaaja koekappaleelle p<sub>3</sub>.

Kuvista 5.5 ja 5.6 havaitaan, että faasimuutosmateriaalia sisältävän laastin ominaislämpökapasiteetti muuttuu lämpötilan noustessa erilailla kuin tavallisilla laasteilla (vrt. kuva 5.3 tai 5.4). Lämpötilan noustessa tavallisten laastien ominaislämpökapasiteetti kasvaa suhteellisen tasaisesti, mutta PCM-laastilla on ominaislämpökapasiteetti-arvoissa selvä piikki. Piikki aiheutuu laastin sisältämän faasimuutosmateriaalin olomuodon muuttumisesta. Faasimuutosmateriaalista johtuen ominaislämpökapasiteetin kokonaiskeskiarvon käyttäminen PCM-laastin kohdalla ei anna oikeaa kuvaa materiaalin ominaisuuksista.

PCM-laastin ja tavallisten laastien kuvaajien lisäksi PCM-laastin eri lämpötilavälein mitatuilla kuvaajilla on selvä ero. Kuvaajista havaitaan, että käyttämällä tavallisia 10 °C välein olevia mittauslämpötiloja ei saada todellista kuvaa faasimuutosmateriaalin vaikutuksesta. 2 °C välein mitatut arvot kuvaavat muutosta paremmin, mutta tämäkin väli saattaa olla liian suuri, sillä faasimuutos tapahtuu hyvin kapealla lämpötila-alueella. FOX50-lämpövirtalevyllä ei kuitenkaan voida mitata tätä pienempää lämpötilaväliä, sillä laskemissa tarvittavien mittaussuureiden tarkkuus heikkenee liikaa <sup>[21]</sup>.

**Taulukko 5.2.** PCM-laastin ominaislämpökapasiteetin muuttuminen 2 °C välein mitattuna. Ominaislämpökapasiteetti on esitetty tilavuutta kohden.

Koekappale	Ominaislämpökapasiteetti $c_p$ [J/(m <sup>3</sup> ·K)]			
PCM p <sub>3</sub> 2 °C välein	10 °C	1 043 621	22 °C	3 204 385
	12 °C	1 245 381	24 °C	1 205 913
	14 °C	1 301 206	26 °C	1 098 060
	16 °C	1 854 188	28 °C	1 100 010
	18 °C	1 863 056	30 °C	1 053 966
	20 °C	2 409 366		

**Taulukko 5.3.** PCM-laastin ominaislämpökapasiteetin muuttuminen 2 °C välein mitattuna. Ominaislämpökapasiteetti on esitetty massaa kohden.

Koekappale	Ominaislämpökapasiteetti $c_p$ [J/(kg·K)]			
PCM p <sub>3</sub> 2 °C välein	10 °C	890	22 °C	2 733
	12 °C	1 062	24 °C	1 029
	14 °C	1 110	26 °C	937
	16 °C	1 582	28 °C	938
	18 °C	1 589	30 °C	899
	20 °C	2 055		

Kuvista 5.5 ja 5.6 havaitaan, että ennen faasimuutosaluetta olleissa arvoissa on kaksi tasaista kohtaa, ja taulukosta 5.2 havaitaan, että näissä kohdissa kahden eri lämpötilan välinen ominaislämpökapasiteetin muutos on hyvin pieni. Syynä saattaa olla mitattavien suureiden epätarkkuudet, sillä tällainen tasaantuminen ominaislämpökapasiteetin arvossa on epätodennäköistä. Jättämällä lämpötiloissa 12 °C ja 16 °C saadut tulokset huomiioon ottamatta saataisiin kauniisti nouseva kuvaaja. Kaikki mittaustulokset on kuitenkin esitetty kuvissa 5.5 ja 5.6.

10 °C välein mitatuissa tuloksissa ei juuri ole vaihtelua koekappaleiden välillä. Eroja aiheuttaa laitteen mittaustarkkuus ja koekappaleiden väliset pienet erot.

## 6 BETONIN LÄMMÖNJOHTAVUUSMITTAUKSET

### 6.1 Koekappaleet

Betonin lämmönjohtavuusmittauksissa oli tarkoitus selvittää FOX50-laitteen soveltuvuus betonimittauksiin ja löytää sopivin mittaussuunnitelma. Tässä työssä mitatut lämmönjohtavuudet ovat 10 °C keskilämpötilassa määritettyjä  $\lambda_{10}$ -arvoja.

Betonikoekappaleet leikattiin tunnetuista kappaleista timanttikoralla. Leikkauksen suoritti TTY:n rakennushallin käyttöinsinööri Tomi Strander ja leikattavina kappaleina käytettiin Elina Maneliuksen diplomityöhönsä (Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen, Tampereen teknillinen yliopisto, lokakuu 2013) tekemiä kiekkoja. Myös koekappaleiden ylä- ja alapintaa leikattiin, jotta kiviainesta saatiin kosketuspintaan. Kuvasta 6.1 nähdään, että osassa koekappaleista pintaan ei juuri osunut suurta kiviainesta, osassa sitä on runsaasti ja osassa se on sijoittunut epätasaisesti. Koekappaleet siis poikkeavat toisistaan.



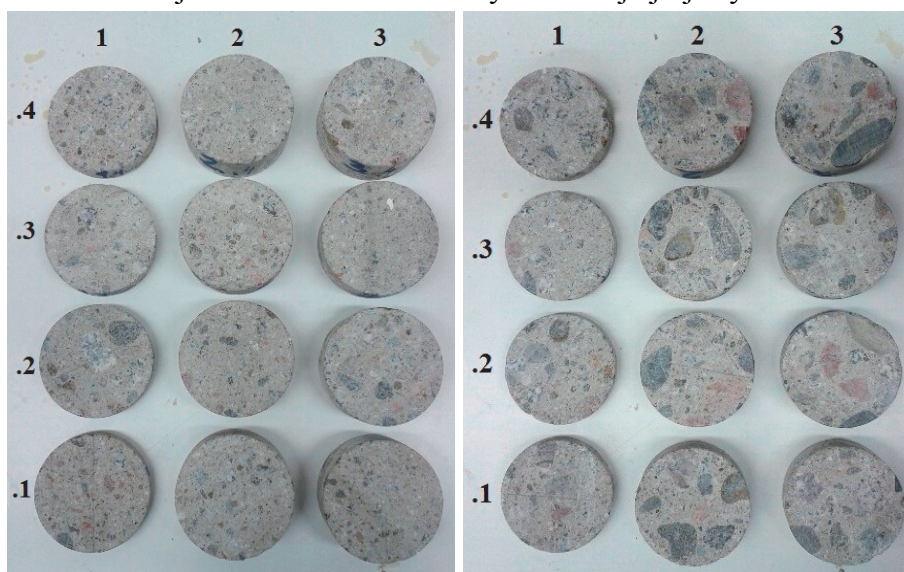
**Kuva 6.1.** Kiviaineksen sijoittuminen pinnassa. Eturivissä muutama C20/25-betonin ja takarivissä C32/40-betonin koekappale. Kuvassa on sekä ylä- että alapintoja.

Tutkittavia betonilaatuja oli kaksi: lujuusluokka C20/25 ja C32/40. Molempien betonien maksimiraekoko oli 16 millimetriä. Muut betonitiedot löytyvät Maneliuksen omaan diplomityöhönsä tekemistä laboratoriotulosteista (liite 5).

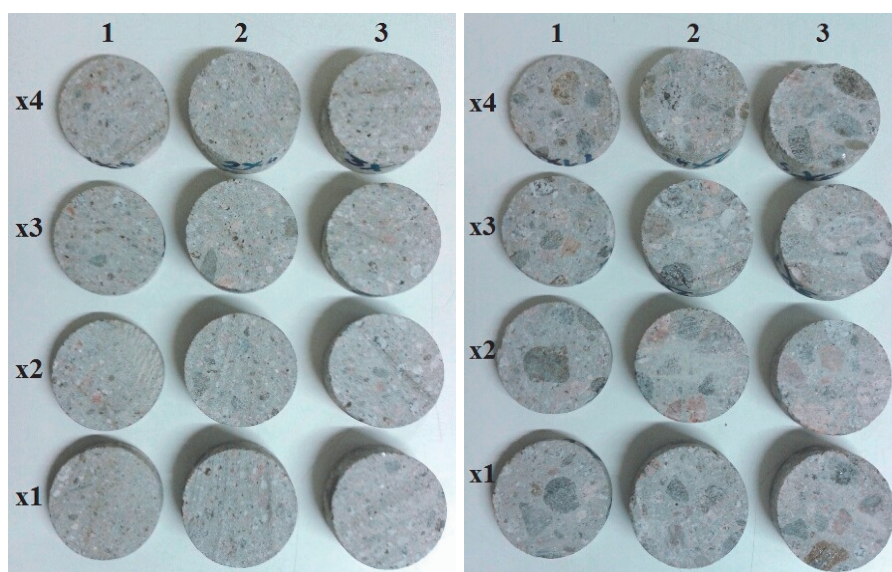
Kummastakin betonilaadusta leikattiin 12 koekappaletta, joista neljä oli noin kymmenen millimetriä ja loput noin 20 millimetriä paksuja. Koekappaleiden halkaisija oli 52 millimetriä. Koekappaleet nimettiin siten, että piste tarkoitti C20/25-betonia ja x kovempaa betonia, ensimmäinen numero tarkoitti kiekkoa, josta kappale oli leikattu, ja jälkimmäinen numero koekappaleen järjestysnumeroa. Esimerkiksi merkintä 2x4 tarkoittaa siten kovemman betonilaadun toisesta kiekosta leikattua neljättä koekappaletta.



Ohuiden kappaleiden kiekkonumero oli yksi, paksummilla kappaleilla kaksi ja kolme. Oheisissa kuvissa 6.2 ja 6.3 kiekkonumero on ylärivissä ja järjestysnumero vasemmalla.



**Kuva 6.2.** C20/25-betonin koekappaleet. Vasemmanpuoleinen kuva on yläpinnasta ja oikeanpuoleinen alapinnasta.



**Kuva 6.3.** C32/40-betonin koekappaleet. Vasemmanpuoleinen kuva on yläpinnasta ja oikeanpuoleinen alapinnasta.

Kuvista 6.2 ja 6.3 havaitaan, että koekappaleiden alapintojen leikkauskohtiin oli osunut enemmän kiviainesta kuin yläpintojen.

## 6.2 Mittausmenetelmävaihtoehdot ja mittausten määrä

Tutkittavat mittausmenetelmät olivat samat kuin laastien mittausmenetelmän valinnassa: koekappaleet sellaisinaan, koekappaleet kumilevyjen kanssa, koekappaleet termolangoilla, kumilevyjen ja termolankojen yhdistelmä sekä two-thickness-menetelmä sellaisinaan ja two-thickness-menetelmä termolangoilla.



Betonin lämmönjohtavuuden mittaamismahdollisuuksia kysyttiin laitetta valmistavan yrityksen asiantuntijalta, joka suosittelee tekemään betonin kanssa noin kymmenen rinnakkaista mittausta johtuen sen epähomogeenisuudesta. Määrä on enemmän kuin laastien lämmönjohtavuusmittausten yhteydessä mainittu vähimmäismäärä. Mittaamalla jokainen koekappale kertaalleen saatiin kaksitoista mittausta yhtä menetelmää kohden, pl. two-thickness-menetelmät, joissa saadaan yhdistelemisen vuoksi kahdeksan kahden kappaleen mittausta. Yksittäismittauksissa valmistajan ohje täyttyi.

Mittausmenetelmänä laitevalmistaja suositti käyttämään betonikoekappaleilla kumilevyjen ja termolankojen yhdistelmää <sup>[21]</sup>. Menetelmässä kumilevyt tasaavat epätasaisen pinnan sekä täyttävät ilmaraot ja termolangat mittaavat kumilevyjen eristämän koekappaleen pinnan todellisen lämpötilan.

### 6.3 Mittaustulokset

Mittauksissa todettiin, että koekappaleet 1.3 ja 3.2 olivat mittauskelvottomia johtuen betonikoekappaleiden leikkauksen yhteydessä syntyneistä lohkeamista. Tältä osin mittausmäärät poikkeavat suunnitelluista. C20/25-betonin kohdalla yksittäismittauksia oli kymmenen ja two-thickness-mittauksia seitsemän. C32/40-betonilla kaikki koekappaleet olivat mittauskelvottomia. Kovempi betoni siis kesti leikkaamista paremmin.

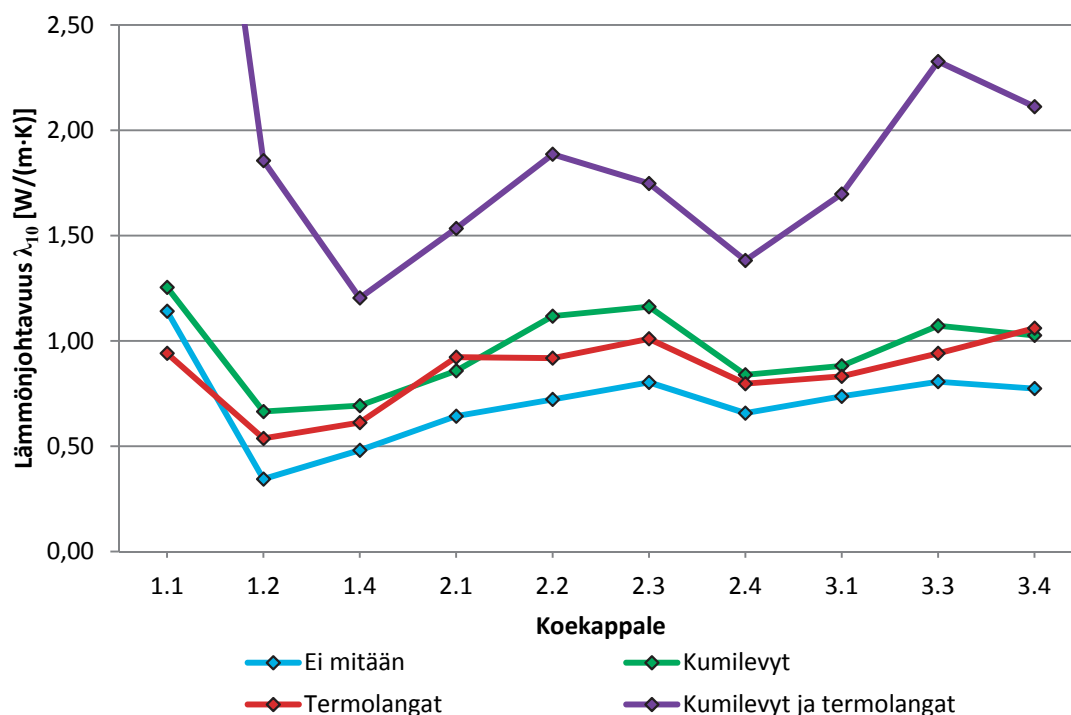
Taulukoiden 6.1 ja 6.2 keskihajonta on laskettu kuten laastien kohdalla.

**Taulukko 6.1.** C20/25-betonin lämmönjohtavuusmittaustulokset, materiaalikosteutena ( $50 \pm 10$ ) % RH (23 °C).

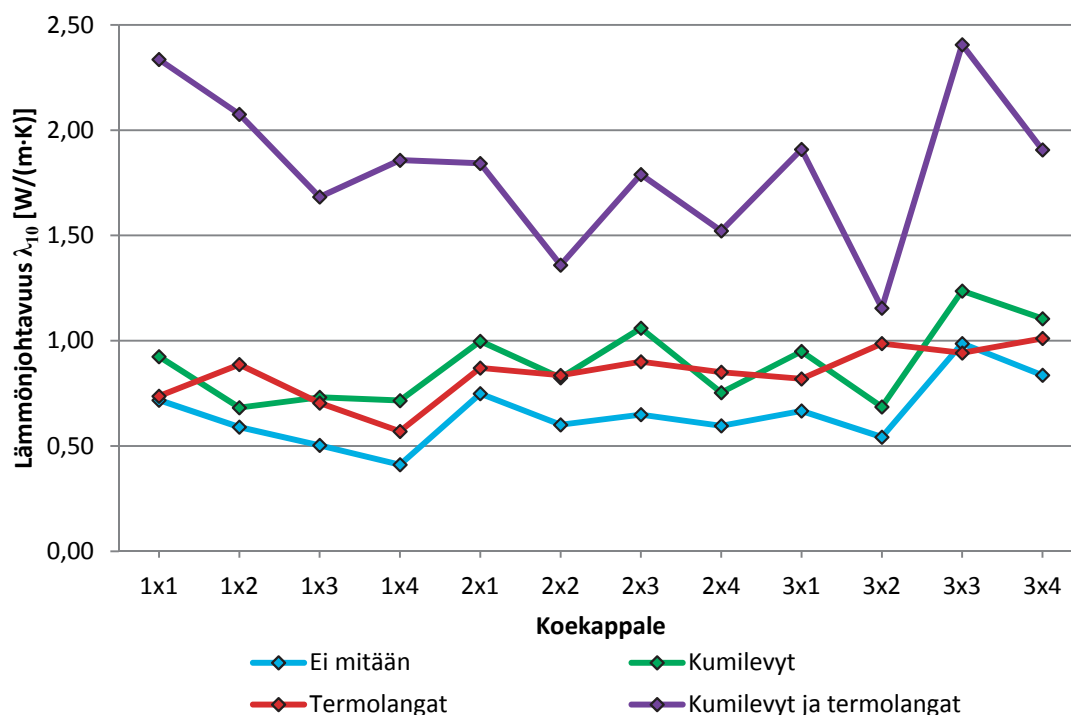
	Maksimiarvo $\lambda_{\max}$ [W/(m·K)]	Minimiarvo $\lambda_{\min}$ [W/(m·K)]	Hyväksytyjen mittausten keskiarvo $\lambda_{\text{mean}}$ [W/(m·K)]	Keskihajonta
Ei mitään	1,14	0,344	0,711	0,21
Two-thickness	1,43	-8,33	0,808	0,34
Kumilevyt	1,25	0,665	0,957	0,19
Termolangat	1,06	0,537	0,857	0,16
Termolangat (two-th.)	15,4	-6,84	1,91	0,63
Kumil. + termol.	5,18	1,20	1,75	0,33

**Taulukko 6.2.** C32/40-betonin lämmönjohtavuusmittaustulokset, materiaalikosteutena ( $50 \pm 10$ ) % RH (23 °C).

	Maksimiarvo $\lambda_{\max}$ [W/(m·K)]	Minimiarvo $\lambda_{\min}$ [W/(m·K)]	Hyväksytyjen mittausten keskiarvo $\lambda_{\text{mean}}$ [W/(m·K)]	Keskihajonta
Ei mitään	0,987	0,411	0,654	0,15
Two-thickness	19,8	-2,85	0,750	0,17
Kumilevyt	1,24	0,682	0,889	0,18
Termolangat	1,01	0,570	0,843	0,12
Termolangat (two-th.)	82,4	-5,63	1,56	0,44
Kumil. + termol.	2,41	1,16	1,82	0,35



**Kuva 6.4.** C20/25-betonin lämmönjohtavuusmittaustulokset koekappaleittain. Koekappaleen 1.1 kumilevy-termolankatulokset (5,182 W/(m·K)) ei mahdu kuvaan.



**Kuva 6.5.** C32/40-betonin lämmönjohtavuusmittaustulokset koekappaleittain.

Mittauksissa käytettiin kalibrointitiedostona Pyrex-tiedostoa, sillä sen arvot olivat lähimpänä betonin arvoja. Koekappaleiden esisäilytyksessä suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyivät ohjearvojen sisällä.

Mittaustulokset on esitetty tarkemmin liitteessä 6.

## 6.4 Tulosten tarkastelu

### 6.4.1 Tutkitut koekappaleet

Taulukossa 6.1 ja kuvassa 6.4 on esitetty C20/25-betonin lämmönjohtavuusmittaustulokset koekappaleittain. Kuvaajan aaltoilu kertoo koekappaleiden vaihtelevuudesta ja kuvaajien väliset erot mittausten menetelmien erilaisuudesta. Alimpana kulkevat pelkkien koekappaleiden tulokset ja ylimpänä kumilevy-termolankatulokset. Menetelmien tuloksissa oli merkittäviä eroja, vaikka keskihajonnat ovat taulukon 6.1 mukaan mittauksissa samaa luokkaa. Mittausmenetelmän valinnassa ei siis voitu hyödyntää keskihajontoja.

Mittauskelvottomia kappaleita oli C20/25- kaksi, joista 3.2 on kuvassa 6.6. Koekappaleesta oli irronnut kivi. Koekappaleen 1.3 mittaaminen kesti noin kolme kertaa kauemmin kuin muilla koekappaleilla ennen kuin laite keskeytti mittauksen, minkä perusteella se todettiin mittauskelvottomaksi. C20/25-betonin keskiarvolaskennassa kumilevy-termolankamittauksista hylättiin yksi ja kummassakin two-thickness-mittauksesta vähintään kaksi tulosta. Hylätyt tulokset olivat negatiivisia tai yli  $3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Kovemman betonin tulokset on esitetty vastaavasti taulukossa 6.2 ja kuvassa 6.5. Tulokset olivat samansuuntaisia toisen betonin kanssa, joskin suurin keskiarvo saatiin tässä kumilevy-termolankamenetelmällä. Sekä menetelmien väliset erot että koekappaleiden keskihajonnat olivat suuria. Kovemman betonin keskiarvolaskelmissa hylättyjä tuloksia oli vain two-thickness-mittauksissa, kummassakin kaksi. Kaikki koekappaleet olivat kelvollisia mittauksiin.

Termolankojen kanssa suoritettavat two-thickness-mittaukset ovat keskiarvoiltaan molemmilla betoneilla hyviä, mutta menetelmä tuottaa merkittävästi toisistaan poikkeavia arvoja. Esimerkiksi C32/40-betonin tapauksessa pienin mittausarvo oli  $-5,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ja suurin  $82 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , minkä vuoksi menetelmää ei voida suositella betonin mittaukseen.

Betonien tuloksista käy selvästi ilmi eri mittausmenetelmien väliset erot. Mittauksissa on siis aina varmistettava, että käytössä on sopiva mittausmenetelmä. Sopivuuden tarkastelua helpottaa, jos lämmönjohtavuuden suuruudesta on etukäteen valistunut arvio. Arviota tarvitaan myös oikean kalibrointitiedoston valintaan.



**Kuva 6.6.** C20/25-betonin hylätty koekappale 3.2. Kappaleen pohjasta on irronnut kivi.

Huonon ja mittauskelvottoman koekappaleen tunnistaminen on helppoa kuvan 6.6 oikeanpuoleisessa tapauksessa. Muissa koekappaleissa ei ollut silminnähtäviä virheitä, mutta

eroja kiviaineksen määrän ja sijainnin suhteen oli, kuten kuvista 6.2 ja 6.3 voidaan havaita. Yhteyttä leikkauspinnan ulkonäön ja mittaustuloksen välillä ei ollut havaittavissa. Esimerkiksi koekappaleet 2.1 ja 3.3 näyttivät ja tuntuivat samanlaisilta, mutta mittaustuloksissa eroa oli  $0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; toisaalta 3x1 ja 3x4 näyttivät samalta ja saivat saman mittaustuloksen. Yhteyttä ei löytynyt myöskään koekappaleen massan ja lämmönjohtavuuden välille.

Saadun mittausdatan perusteella voidaan suositella, että tulevilla mittauksilla epähomogeeniselta materiaaalilta valitaan mahdollisimman monipuolisesti erilaisia kappaleita.

#### **6.4.2 Betonin lämmönjohtavuus kirjallisuudessa**

Betonin lämmönjohtavuuden arvo vaihtelee tiheyden mukaan. Tutkittujen betonikoekappaleiden tiheys on noin  $2\,200\text{--}2\,300 \text{ kg}/\text{m}^3$ , jolle Suomen rakentamismääräyskokoelma antaa lämmönjohtavuudeksi  $1,2\text{--}1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  <sup>[9]</sup>. Muissa lähteissä lämmönjohtavuuden vaihteluväli on  $1,0\text{--}1,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  <sup>[31]</sup>. Kummankin betonilaadun osalta kumilevy-termolankamittaus sijoittuu lähimmäksi kirjallisuuden antamaa väliä.

### **6.5 Johtopäätös**

FOX50-laite soveltuu betonin lämmönjohtavuusmittauksiin tietyin edellytyksin. Materiaalin epähomogeenisuuden vuoksi yksittäiset mittaustulokset voivat poiketa toisistaan huomattavasti, joten mitattavia koekappaleita on oltava riittävästi ja tuloksia on osattava arvioida. Sekä laitevalmistajan mukaan että koemittausten perusteella suositeltavin mittausmenetelmä on kumilevyjen ja termolankojen yhdistelmä ja koekappaleiden lukumäärä vähintään kymmenen koekappaletta.

## 7 BETONIN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTI-MITTAUKSET

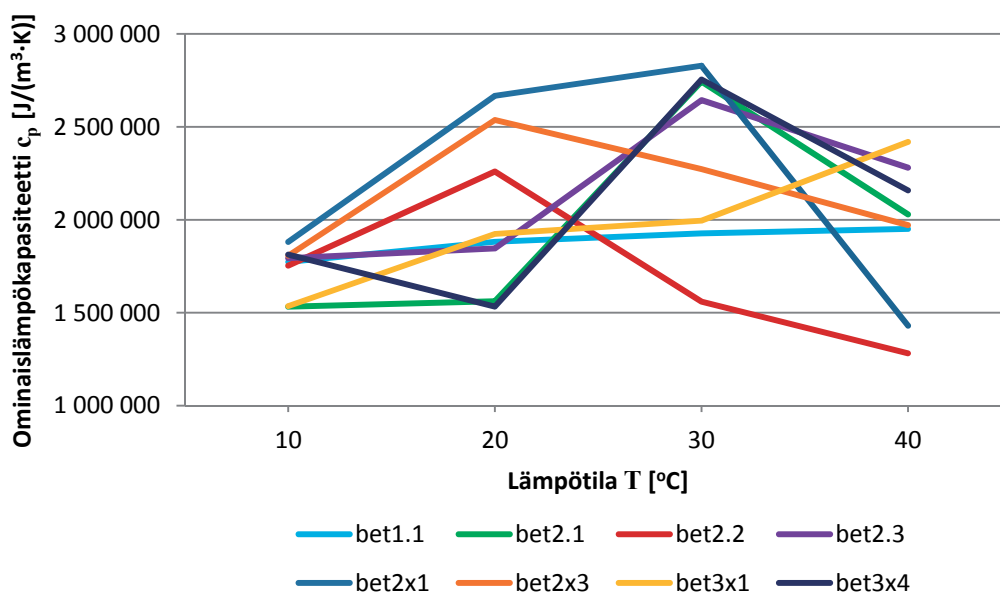
### 7.1 Koekappaleet ja mittausmenetelmä

Betonien ominaislämpökapasiteettimittauksissa tarkoituksena oli selvittää FOX50-lämpövirtalevylaitteen soveltuvuus epähomogeenisen materiaalien ominaislämpökapasiteetin määrittämiseen. Mittauksissa pyrittiin löytämään sopivin mittausmenetelmä.

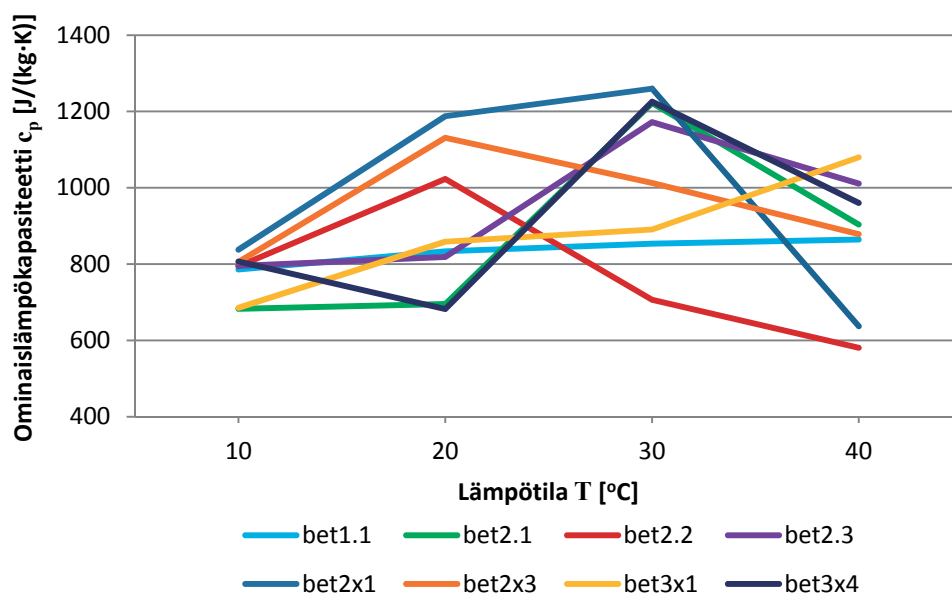
Mittauksissa käytettiin samoja koekappaleita kuin lämmönjohtavuusmittauksissa. Kummastakin betonista valittiin sattumanvaraisesti neljä koekappaletta, jotka mitattiin sellaisinaan. Sattumanvaraisella valinnalla pyrittiin jäljittelemään todellista mittaustilannetta, jossa koekappaleita ei voida esikarsia.

### 7.2 Mittaustulokset

Laitevalmistajan mukaan epähomogeenisten materiaalien ominaislämpökapasiteetteja ei voida määrittää luotettavasti ilman perusasetusten muuttamista <sup>[21]</sup>. Tässä ominaislämpökapasiteettiä mitattiin kahdesti: ensin muuttamalla *Gain Level* -tasoa ja seuraavaksi muuttamalla PID-kertoimia. Ensimmäisissä mittauksissa *Gain Level* laskettiin neljään, mikä suurentaa mikrovolttien määrää, mikä puolestaan tarkentaa mittaussarvojen lukemista eri mittauspisteiden välillä.

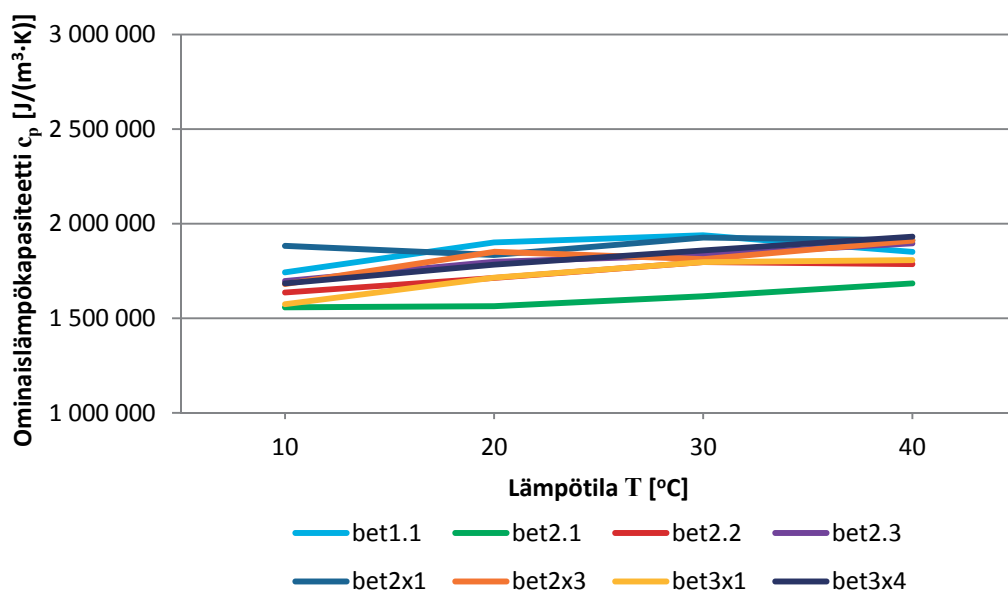


**Kuva 7.1.** Betonien ominaislämpökapasiteettimittauksen tulokset *Gain Level* -tason muutoksella.

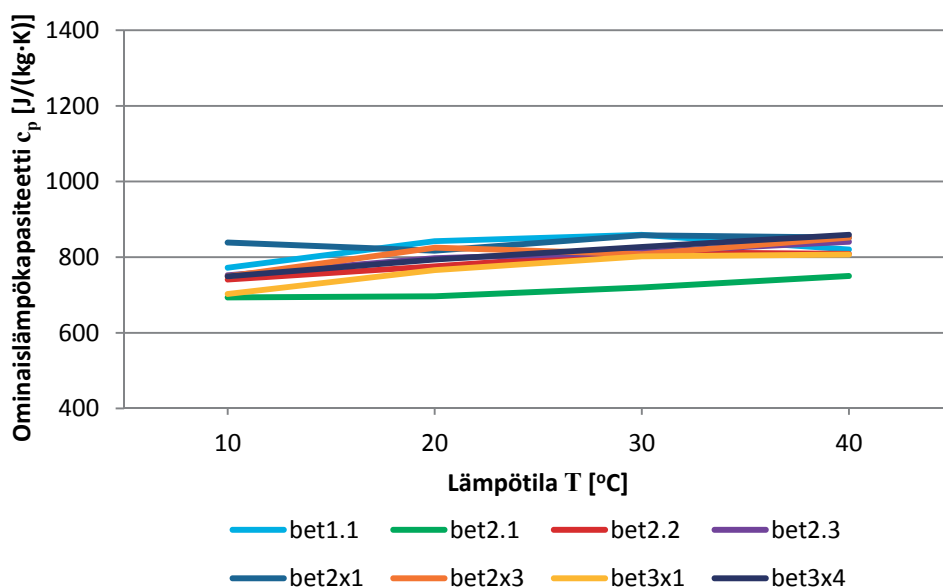


**Kuva 7.2.** Betonien ominaislämpökapasiteettimittausten tiheydellä jaetut tulokset Gain Level -tason muutoksella.

Seuraavassa mittauksessa heilahtelua mittauspisteiden välillä pyrittiin vähentämään muuttamalla PID-kertoimia, jotka vaikuttavat lämpötilojen tasaantumiseen. PID-kertoimina Main-kohdassa oli 5 °C lämpötilassa 49 (heating) ja 70 (cooling) ja Equil-kohdassa 20 ja 56. Muissa lämpötiloissa vastaavissa kohdissa käytettiin PID-kertoimia 42 ja 60 sekä 17 ja 48. Lämpövirtalevyalaite käytti Main-kohdan kertoimia mittauksen alussa ja siirtyi tasapainotilan saavutettuaan käyttämään Equil-kohdan kertoimia. PID-kertoimien muuttamisen vaikutuksia seurattiin lämpötilakuvaajasta, jonka avulla löydettiin sopivimmat kertoimet. Kertoimia muutettiin, kunnes lämpötilat saatiin pysymään vakiona  $\pm 0,01$  °C tarkkuudella.



**Kuva 7.3.** Betonien ominaislämpökapasiteettimittausten tulokset PID-muutoksilla.



**Kuva 7.4.** Betonien ominaislämpökapasiteettimittausten tiheydellä jaetut tulokset PID-muutoksilla.

Mittaustulosten kuvaajat on esitetty kuvissa 7.1 ja 7.3, ja koekappaleiden tiheydellä jaettujen tulosten kuvaajat kuvissa 7.2 ja 7.4. Kunkin koekappaleen tulos jaettiin kyseisen koekappaleen omalla tiheydellä. Tiheydellä jaetut tulokset on myös koottu taulukkoon 7.1.

**Taulukko 7.1.** Tutkittujen betonikoekappaleiden ominaislämpökapasiteetit (25 °C).

Kappale \ Muutos	Gain Level $c_p$ [J/(kg·K)]	PID-kerroin $c_p$ [J/(kg·K)]	Ero $\Delta c_p$ [J/(kg·K)]
1.1	834	823	-11
2.1	876	715	-161
2.2	776	785	+9
2.3	949	801	-148
2x1	981	841	-140
2x3	957	808	-149
3x1	879	769	-110
3x4	919	807	-112

Mittaustulokset on esitetty tarkemmin liitteestä 7.

### 7.3 Tulosten tarkastelu

Kuvista 7.1 ja 7.2 havaitaan, että *Gain Level* -tason parantamisesta huolimatta kuvaajat eivät kulje odotetusti eli arvot eivät nouse tasaisesti. PID-kertoimien muuttamisen vaikutus on esitetty kuvissa 7.3 ja 7.4, joissa kuvaajat kulkevat oikeaoppisemmin ja muistuttavat muodoltaan aiemmin esillä olleiden laastien ominaislämpökapasiteettikuvaajia.

Kuvissa 7.3 ja 7.4 havaittavat yksittäiset notkahdukset kuvaajissa ovat prosentuaalisesti pieniä.

Taulukossa 7.1 on esitetty mittaustuloksista lasketut ominaislämpökapasiteetin arvot lämpötilassa 25 °C. Kahta kappaletta lukuun ottamatta PID-kertoimien muuttamisella on saatu selvästi alempi tulos kuin *Gain Level* -muutoksella. *Gain Level* -muutoksella ominaislämpökapasiteetit vaihtelevat 776–981 J/(kg·K) välillä ja PID-kertoimen muutoksilla 715–841 J/(kg·K) välillä. Vaihteluvälin suuruus menetelmän sisällä johtui koekappaleiden keskinäisistä eroista, mikä puolestaan selittyi betonin epähomogeenisuudella. Kirjallisuudessa betonin ominaislämpökapasiteetiksi ilmoitetaan 750–960 J/(kg·K) riippuen betonin tiheydestä siten, että kivipitoisemmalla betonilla ominaislämpökapasiteetti on alempi <sup>[33]</sup>. Sekä *Gain Level* -tason että PID-kertoimien muutoksilla saadut tulokset ovat melko yhteneviä kirjallisuusarvojen kanssa.

Koska molemmat menetelmät antavat kirjallisuusarvojen mukaisia tuloksia, molempia menetelmiä voitaisiin pitää hyvinä. Kuvaajista kuitenkin nähdään selkeästi, että vain PID-kertoimien muutoksilla saadaan kuvaajille oikea, teorian mukainen muoto, minkä vuoksi sitä voidaan pitää luotettavampana. Toisaalta kuvaajan epätavallinen muoto ei välttämättä tarkoita poikkeavaa tulosta, esimerkiksi betonikappaleen 2.2 kuvaaja kulkee kuvassa 7.2 erittäin epätyypillisesti ja kuvassa 7.4 halutunlaisesti, mutta silti taulukon 7.1 keskiarvoja verratessa tuloksissa on mitätön ero.

## 7.4 Johtopäätös

FOX50-laite soveltuu betonien ominaislämpökapasiteettimittauksiin PID-kertoimia muuttamalla.



## 8 LAITE-EROT

### 8.1 Koekappaleet ja mittausmenetelmä

Laite-erojen vertailussa otettiin tarkasteluun mukaan FOX304-laite, johon valmistettiin omat, FOX50-laitteen koekappaleita huomattavasti suuremmat koekappaleet. Koekappaleiden koko oli noin 300x300x50 mm ja koekappaleita valmistettiin 14, yksi per tuote. Koska Saneerauslaastin koekappale epäonnistui (kappaleessa oli muun muassa ylisentin syvyisiä rakoja), oli mitattavia tuotteita lopulta 13. Valtaosa koekappaleista näytti ulkoisesti virheettömiltä. Parissa oli vähäisiä vikoja, kuten lievästi pyöristyneitä nurkkia. Huonoimmat koekappaleet ovat esillä seuraavan sivun kuvissa 8.2, myös hylätty Saneerauslaasti.

Ensimmäisenä mittausmenetelmänä käytettiin pelkkiä koekappaleita ja toisena kuparitahnaa, joka on aiemmissa mittauksissa todettu toimivaksi menetelmäksi tämän laitteen kanssa. Pelkät koekappaleet tarjosivat vertailukohdan. Koekappaleet käärittiin mittauksissa ohueen läpinäkyvään muoviin, jottei niihin sitoutunut kosteus päässyt haihtumaan kokeen aikana ja jottei tahna sotkenut laitteen ylä- ja alalevyjä. Oheisessa kuvassa 8.1 koekappale on valmis mitattavaksi lukuun ottamatta sen ympärille käärittävää muovikelmua.



**Kuva 8.1.** Iso koekappale, jonka pinnat on sivelty kuparitahnalla. Kuvassa Multiplan.

Mittaukset suoritettiin standardia SFS-EN 12667 (2001) noudattaen (lähde [11]). Lämpötilana FOX304-laiteella ylälevyllä oli 0 °C ja alalevyllä 20 °C, ja täten lämpövirran tiheyden suunta ylöspäin. Lämpötilat olivat siis päinvastoin kuin FOX50-laiteella. Syy-

nä ylä- ja alalevyn lämpötilojen vaihtoon oli se, että FOX304-laitteessa alalevyn lämpötilaa ei pystytäkään laskemaan 0 °C:een, sillä se on kalibrointialueen ulkopuolella. Kalibrointiin käytettiin sekä laitteen valmistajan asentamaa paksuuden mukaista kalibrointitiedostoa että eurooppalaisten standardien mukaista IRMM-PTS-2011-04-14 -tiedostoa.



**Kuva 8.2.** Isojen koekappaleiden valmistusvikoja. Ylhäällä vas. OT Light ja Highflex S2, alhaalla vas. Saneerauslaasti (hylättiin) ja OTR.

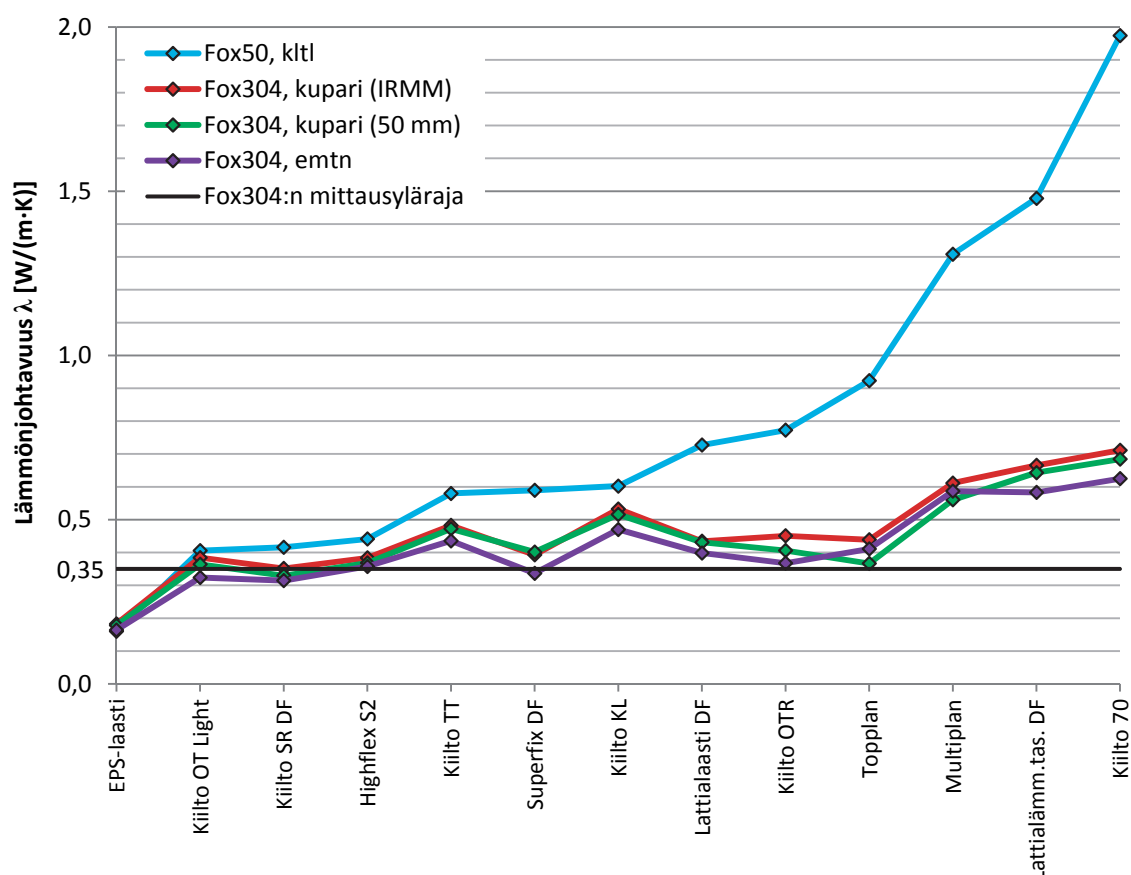
## 8.2 Mittaustulokset

Mittauksissa tapahtui virheitä signaaliarvojen lukemisessa (”average signal for block saturated”). Laite otti huomioon nämä virheet eikä laskenut niiden arvoja mukaan; toisaalta poisjätto vähensi mittauspisteiden lukumäärää ja heikensi täten tarkkuutta suhteessa niihin koekappaleisiin, joiden kaikki mittauspisteet olivat mukana mittauksessa.

Signaalihäiriöiden määrä vaikutti olevan yhteydessä materiaalin lämmönjohtavuuteen. Seinätasotteista ja kiinnityslaasteista vain muutamalla materiaalilla oli yhdestä kolmeen häiriötä ja muut olivat häiriöttömiä. Jokaisessa lattiatasoitteen mittauksessa sen sijaan oli vähintään kaksi häiriötä. Eniten signaalihäiriötä oli Kiilto 70 -laastin mittauksissa: pelkillä koekappaleilla kahdeksan ja kuparitahnan kanssa 16 tai 23 riippuen kalibrointitiedostosta.

Mittaustulokset on koottu kuvaan 8.3. Sininen käyrä kuvaa FOX50-laitteella saatuja lämmönjohtavuuksien keskiarvoja, siis Laastien lämmönjohtavuusmittaukset -luvussa esitettyjä arvoja. Kuvan vihreä, punainen ja violetti käyrä ovat FOX304-mittaustuloksia. Violetti käyrä kuvaa pelkkien koekappaleiden tuloksia, vihreä ja punainen kuparipastalla siveltyjä. Vihreän ja punaisen erona on mittauksissa käytetty kalibrointitiedosto. Ku-

vaan on merkitty lisäksi tummemmalla viivalla lämmönjohtavuuden arvo  $0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , joka on ilmoitettu FOX304-laitteelle lämmönjohtavuuden mittausalueen ylärajaksi.



**Kuva 8.3.** Laastien lämmönjohtavuusmittausten tulokset. Mittaukset on suoritettu FOX-lämpövirtalevylaitteilla.

Otoskokona FOX50-laitteen mittauksissa oli kuusi mittausta, lukuun ottamatta niitä poikkeuksia, joka oli mainittu mittauksia käsittelevässä luvussa. FOX304-laitteen otoskoko oli kaikilla mitatuilla laasteilla yksi.

FOX304-laitteen tulokset on koottu liitteeseen 8.

### 8.3 Tulosten tarkastelu

Kuvan 8.3 tuloksista nähdään, että FOX304-mittauksissa kuparitahnalla sivellyn ja pelkän koekappaleen lämmönjohtavuusarvojen välille ei syntynyt suurta eroa. Kuparitahnin tehtävänä on parantaa laitteen levyjen ja koekappaleen pinnan välistä kontaktia, mutta sillä ei voida vaikuttaa koekappaleiden valmistusvirheisiin (kuva 8.2) tai mittaustulosten muihin virheisiin. Yksi vaihtoehto on, ettei kuparitahna toiminut halutulla tavalla ja edesauttanut kontaktia, mutta tämä on todettu aiemmissa mittauksissa epätodennäköiseksi <sup>[19]</sup>. Todennäköisempää on, että pinnan ja levyn kontakti oli alun alkaenkin varsin hyvä.

Eroja ei syntynyt myöskään FOX304-laitteen eri kalibrointitiedostojen välille, vaan kuvaajat kulkevat lähellä toisiaan siten, että IRMM-kuvaaja on hieman toisen yläpuolel-

la; pääasiassa ero on enintään 3 %. Mittaustulosten kannalta ei siis ollut juuri merkitystä sillä, kumpi kalibrintitiedosto oli käytössä.

Kuparitahnalla sivellyn koekappaleen kuvaajan tulisi kulkea vähintään pelkän koekappaleen kuvaajan kohdalla tai hieman sen ylä-, muttei alapuolella. Muiden kohdalla tämä toteutui, mutta Topplan- ja Multiplan-laastit tekivät tältä osin poikkeuksen vihreän kuvaajan osalta. Toisaalta näiden laastien lämmönjohtavuus on korkea suhteessa laitteen mittausalueen ylärajaan, joten virheet ovat odotettavia, eivätkä saadut mittaustulokset olleet lähelläkään oikeita arvoja.

Verrattaessa FOX304- ja FOX50-laitteiden mittauksia toisiinsa huomataan, että alhaisilla lämmönjohtavuuksilla erot ovat varsin pienet. FOX304-laite sai mittauksissaan saman arvon EPS-laastille kuin FOX50-laite, ja seuraavilla materiaaleilla ero oli melko maltillinen, enintään kymmenyksen (pl. Superfix DF). KL-laastin jälkeen kuvaajien ero kasvaa nopeasti eivätkä FOX304-kuvaajat enää noudattele oikean lämmönjohtavuuden kuvaajaa. Isojen koekappaleiden kuvaajat itse asiassa notkahtavat ennen lopun lievää nousua. Korkeimman lämmönjohtavuuden laastilla ero todellisen lämmönjohtavuuden ja isojen koekappaleiden kuvaajan välillä on jo puolitoista yksikköä.

Laitteiden väliset erot selittyvät osin FOX304-laitteen kalibrintitiedostoilla, joiden seurauksena laitteen toimivuus alueensa ulkopuolella heikkenee huomattavasti, ja virhe kasvaa. Virhesignaalien määrä on yksi merkki tästä. Eräs parannusmahdollisuus on kalibroida laite korkeammille arvoille, mutta koska laitetta ei ole tarkoitettu muihin kuin lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuusalueen mittauksiin, ei tämä ole ihanteellinen ratkaisu: lämmöneristeille suunniteltu laite ei välttämättä ota huomioon riittävän tehokkaasti laitteen termistä kontaktivastusta tai kappaleen pinnan lämmönvastusta. Valmistaja suositteleeikin käyttämään lämmönjohtavuusmittauksiin alueelle parhaiten soveltuvaa laitetta.

## 8.4 Johtopäätös

FOX304-laitteen luotettava mittausalue päättyy valmistajan mukaan arvoon 0,35 W/(m·K). Suoritetut mittaukset tukevat väitettä, eikä laite mittausten perusteella sovellu nykyisellään muiden kuin lämmöneristemateriaalien tai niiden lämmönjohtavuusalueella olevien materiaalien lämmönjohtavuuksien mittaamiseen.

## 9 YHTEENVETO

Tässä työssä on perehdytty lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin määrittämiseen lämpövirtalevylaitteilla. Kaikki mittaukset on suoritettu Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen tiloissa käyttäen kappaleina erilaisia laasti- ja betonituotteita. Mittauslaitteen toiminnan ymmärtäminen on välttämätön osa mittausten onnistumista, minkä vuoksi laitteen rajojen hakeminen ja menetelmien vertaileminen on tärkeää. Näitä asioita on tutkittu Ffiller-projektiin liittyvien mittausten yhteydessä.

Laastien lämmönjohtavuusmittaukset suoritettiin korkeammille lämmönjohtavuuksille tarkoitetulla FOX50-laitteella. Mittausmenetelmän valinta osoittautui tulosten oikeellisuuden kannalta merkittävimmäksi yksittäiseksi tekijäksi, minkä vuoksi oikeimman menetelmän selvittämiseen kannattaa käyttää aikaa jokaisen uuden materiaalin kohdalla. Mittauksissa kävi ilmi, että käytettäessä kumilevyjä on suositeltavaa käyttää mahdollisimman paksuja koekappaleita kumilevyvaikutuksen vähentämiseksi.

Mittaustuloksista lattiatasoitteille mitattiin suurimmat lämmönjohtavuuden arvot. Seinätasoitteiden ja kiinnityslaastien lämmönjohtavuudet ovat noin puolet lattiatasoitteiden arvoista ja keskenään samansuuruisia. Mittauksissa paksujen ja ohuiden koekappaleiden väliset prosenttierot ovat pääasiassa maltillisia, ja materiaalin lämmönjohtavuus nousee tiheyden kasvaessa. Saatuja laastien lämmönjohtavuusarvoja tarkasteltaessa on otettava huomioon, että laastien lämmönjohtavuusalue on laaja, minkä vuoksi ne pystyvät noudattelemaan kirjallisuusarvoja vain jossain määrin, eikä kirjallisuudessa laasteille esitetty yksi arvo ole missään tapauksessa riittävä kuvaamaan kaikkia erityyppisiä laasteja. Tuloksille tehdyissä tarkasteluissa arvot käyttäytyvät odotetusti, joten saatujen tulosten voidaan todeta olevan totuudenmukaisia.

Yksi tutkituista laasteista sisälsi faasimuutosmateriaalia. Verrattaessa faasimuutosmateriaalilla muunnettua laastia sen pohjana toimivaan laastiin huomataan, että faasimuutosmateriaalin lisäyksellä laastimassaan on vaikutusta lämmönjohtavuuden arvoon (tällä laastilla alentavasti) ja että se pysäyttää lämmönjohtavuuden nousun lämpötilan noustessa faasimuutosalueelle. Lämmönjohtavuuden nousu ei kuitenkaan ollut merkittävää kummallakaan näillä kahdella laastilla.

FOX50-lämpövirtalevylaitteella voidaan tehdä lämmönjohtavuusmittausten lisäksi ominaislämpökapasiteettimittauksia. Lämpötilan tasoittumista ja heilahtelua voitiin kontrolloida PID-kertoimia muuttamalla. Saadut laastien ominaislämpökapasiteetit noudattavat kirjallisuudessa esitettyä mallia, jossa hiekkaisilla laasteilla on pienempi arvo kuin hienojakoisemmilla laasteilla ja jossa ominaislämpökapasiteetin arvo nousee lämpötilan noustessa. Mitatut arvot ovat myös melko lähellä kirjallisuusarvoja. Näiden perusteella mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina.

Faasimuutosmateriaalia sisältävän laastin ominaislämpökapasiteetin muuttuminen saatiin selville pienentämällä lämpötilaväli minimiin ja muuttamalla PID-kertoimia. Tällä tavalla ominaislämpökapasiteetin arvojen kuvaajaan saatiin näkyviin faasimuutosmateriaalille tyypillinen selvä piikki faasimuutoskohtaan. Laite sopii siis myös faasimuutosmateriaalia sisältävien tuotteiden mittaamiseen.

Betonin lämmönjohtavuusmittauksissa tarkoituksena oli selvittää FOX50-laitteen soveltuvuus betonimittauksiin ja löytää sopivin mittausten menetelmä. Koekappaleiden tiedot raekokojakaumineen ja vesi-sementtisuhteineen olivat tiedossa ennen mittausten aloittamista, ja valmistajan ohjetta mitata betoni vähintään kymmenen kertaa pyrittiin noudattamaan. Lopullisista tuloksista käy selville paitsi koekappaleiden väliset erot, myös ennen kaikkea se, miten eri mittausten menetelmät soveltuvat betonille. Vertaamalla tuloksia kirjallisuusarvoihin parhaaksi mittausten menetelmäksi todettiin laitevalmistajan kin suosittelema kumilevyjen ja termolankojen yhteiskäyttö, jossa kumilevyt tasaavat koekappaleen pinnan ja termolangat mittaavat pinnan todellisen lämpötilan. Betonin lämmönjohtavuusmittauksen onnistumisen edellytyksenä on koekappaleiden riittävä määrä ja niiden vaihtelevuus, sillä kappaleiden epähomogeenisuuden vuoksi tuloksissa on merkittävää hajontaa. Koekappaleen ulkonäön perusteella on vaikea arvioida saatavan mittaustuloksen suuruutta. Valmistajan suosittelema minimimäärä lienee valtaosassa mittauksista riittävä.

Betonien ominaislämpökapasiteettimittauksissa haluttiin tutkia, soveltuuko FOX50-laite epähomogeenisen materiaalin ominaislämpökapasiteetin mittaamiseen ja millä ehdoin. Koekappaleet valittiin sattumanvaraisesti valmiiden kappaleiden joukosta, jotta tilanne muistuttaisi oikeaa mittaustilannetta, jossa esikarsintaa ei ole. Ensimmäisissä mittauksissa *Gain Level* -tasoa alennettiin. Tulosten kuvaajat eivät noudattaneet niiltä odotettua muotoa, mutta mittauksista lasketut keskiarvot ovat kirjallisuusarvojen mukaisia. Samat kappaleet mitattiin uudelleen PID-kertoimia muuttamalla, jolloin ominaislämpökapasiteettikuvaajat saatiin kulkemaan odotetulla tavalla. PID-kertoimien muutoksilla lopputulokset alenivat *Gain Level* -arvoista, mutta olivat vielä kirjallisuusarvojen mukaisia. PID-kertoimia tarkentamalla laite soveltuu betonien ominaislämpökapasiteettimittauksiin.

Laitevertailun tarkoituksena oli selvittää kahden eri lämmönjohtavuuksille tarkoitettun lämpövirtalevylaitteen toiminnan eroja. Laite-eroja selvitettiin, koska haluttiin tietää, olisiko vanha lämmöneristeille tarkoitettu lämpövirtalevylaitte soveltunut tässä työssä tutkittujen materiaalien mittaamiseen. Laite-erojen selvittämisessä käytettiin laasteja, sillä niiden lämmönjohtavuusalue oli sopivan laaja. Laasteista yksi oli molempien laitteiden ohjeiden mukaisella mittaustilalla.

Laastien lämmönjohtavuuksia mitattiin FOX304-laitella kahdella eri menetelmällä, sellaisinaan ja kuparipastalla, mutta niiden tulokset eivät poikenneet merkittävästi toisistaan, eikä kalibrointitiedoston vaihtamisellakaan ollut suurta vaikutusta mittaustuloksiin. Näitä FOX304-lämpövirtalevylaitteella saatuja tuloksia verrattiin FOX50-laitteella aiemmin saatuihin lämmönjohtavuuksiin. Lämmöneristeille tarkoitettulla FOX304-laitteella saadut tulokset poikkesivat merkittävästi korkeammille lämmönjohtavuuksille

tarkoitettulla FOX50-laitteella mitatuista arvoista. Mittausten perusteella laitevalmistajan FOX304-laitteelle ilmoittama lämmönjohtavuuden yläraja  $0,35 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  pitää paikkansa eikä laite sellaisenaan sovellu muiden kuin lämmöneristeiden tai niiden lämmönjohtavuusalueella olevien materiaalien lämmönjohtavuuksien mittaamiseen. Laitevalmistaja ei suosittele laitteen mittausalueen nostamista laitteen toimintaperiaatteen vuoksi.

Työn kautta nousi esiin muutama mielenkiintoinen lisätarkastelun kohde, esimerkiksi miten hyvin korkeammille lämmönjohtavuuksille tarkoitettu lämpövirtalevylaite soveltuu lämmöneristemateriaalien ominaislämpökapasiteettien mittaamiseen. Lisäksi olisi kiinnostavaa tehdä diplomityössä tehdyn laitevertailun kaltainen vertailu myös toiseen suuntaan eli selvittää, kuinka tarkasti korkeammille lämmönjohtavuuksille tarkoitettulla laitteella voidaan mitata omaa mittausaluettaan pienempiä lämmönjohtavuuksia. Näin uuden laitteen toiminta-alue saataisiin kokonaisuudessaan selville.

## LÄHTEET

- [1] Holman, J. P. Heat Transfer, Tenth edition. Kymmenes laitos. 2010, McGraw-Hill. 758 s. ISBN 978-0-07-352936-3.
- [2] Vuorinen, P. Energiatehokasta ja kestäväää rakentamista, Rakennusteollisuuden näkökulmia energiatehokkuuteen [verkkodokumentti]. Rakennusteollisuus RT ry. Lahti, 13.04.2011. Viitattu 07.10.2013. Saatavissa: [http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/puusuomi/Pekka%20Vuorinen%20RT%20ry%20n%C3%A4k%C3%B6kulmia%20energiatehokkuuteen%20\\_13042011.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/puusuomi/Pekka%20Vuorinen%20RT%20ry%20n%C3%A4k%C3%B6kulmia%20energiatehokkuuteen%20_13042011.pdf)
- [3] Airaksinen M., Seppälä J., Vainio T., Tuominen P., Regina K., Peltonen-Sainio P., Luostarinen S., Sipilä K., Kiviluoma J., Tuomaala P., Savolainen I., Kop-sakangas-Savolainen M. Rakennetun ympäristön hajautetut energijärjestelmät. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2013 [verkkodokumentti]. Espoo, 2013. 31 s. Viitattu 07.10.2013. Saatavissa: [http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset\\_lausunnot/Rakennetun%20ymp%C3%A4ris%C3%B6n%20hajautetut%20energij%C3%A4rjestelm%C3%A4t.pdf](http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset_lausunnot/Rakennetun%20ymp%C3%A4ris%C3%B6n%20hajautetut%20energij%C3%A4rjestelm%C3%A4t.pdf)
- [4] Lienhard, J. H. A Heat Transfer Textbook, Third edition. Kolmas laitos. 2003, Phlogiston Press. 762 s. ISBN 978-0971383524.
- [5] Young, H. D., Freedman, R. A. Sears and Zemansky's University Physics, Tenth edition. Kymmenes laitos. 2000, Addison-Wesley Series in Physics. s. 460–586. ISBN 0-201-60322-5.
- [6] Gutierrez-Miravete, E. Chapter 1 The Heat Equation [verkkodokumentti]. 2006, Rensselaer Polytechnic Institute. Kurssiaineistoa. 9 s. Viitattu 01.07.2013. Saatavissa: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/S2006/CHT/Notes/ch01.pdf>
- [7] Hagentoft C.-E. Introduction to Building Physics. 2003, Studentlitteratur. 422 s. ISBN 91-44-01896-7.
- [8] FOX50 110°C Instrument Manual. LaserComp Inc. Laitteen käyttöohje. 41 s.
- [9] Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Lämmöneristys. Luonnos 16.3.2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 47 s.
- [10] Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristet tuotteet. Tyyppihyväksyntäohjeet 2007. Helsinki 2007, Ympäristöministeriö. 12 s.



- [11] SFS-EN 12667. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus. = Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. Helsinki 2001, Suomen standardoimisliitto. 54 s.
- [12] Mills, A.F. Basic Heat & Mass Transfer, Second edition. Toinen laitos. 1999, Prentice-Hall. 1000 s. ISBN 0-13-096247-3.
- [13] Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., Käkelä, P. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampere 2005, Tampereen teknillinen yliopisto. 321 s. ISBN 952-15-1378-0.
- [14] Theory of the Method [verkkodokumentti]. 2001–2003, LaserComp Inc. 2 s. Viitattu 05.06.2013. Saatavissa: <http://www.lasercomp.com/Tech%20Papers/Methods/Heatlow%20Meter%20Theory%20of%20test%20%20method.pdf>
- [15] SFS-EN 12664. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Kuivat ja kosteat tuotteet, joilla on suhteellisen matala tai matala lämmönvastus. = Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance. Helsinki 2001, Suomen standardoimisliitto. 72 s.
- [16] Air Gap Inaccuracy – Explanation and Solution. LaserComp Inc. Julkaisematon selvitys. 1 s.
- [17] Testing materials with moderate thermal conductivity using FOX Heat Flow Meter instruments (with help of two rubber sheets). 2012, LaserComp Inc. Julkaisematon selvitys. 4 s.
- [18] Testing samples on the FOX50 instrument using external thermocouples. 2008, LaserComp Inc. Julkaisematon selvitys. 3 s.
- [19] Improving accuracy in heat flux measurements [verkkodokumentti]. Vateil Corporation, 2001. 6 s. Viitattu 04.07.2013. Saatavissa: [www.vatell.com/improving\\_accuracy.pdf](http://www.vatell.com/improving_accuracy.pdf)

- [20] Valovirta, I. Lämpövirtalevylaitteen toimintaperiaate ja yleisimmät ongelmat. Tampere 2005, Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisematon selvitys. 12 s.
- [21] Sähköpostiviestittely 2011–2013. Vastausten antajat: Akhan Tleoubaev (Ph.D, tutkimus- ja kehitystyö, LaserComp Inc.), Andrzej Brzezinski (LaserCompin toimitusjohtaja, omistaja), Kevin Collins (markkinointipäällikkö, LaserComp Inc.). Keskustelut löytyvät Tampereen teknilliseltä yliopistolta ”LaserComp FOX 50 Lämpövirtalevyalaite korkeille lämmönjohtavuuksille” -kansiossa. Julkaisematon.
- [22] Statistics Sheet for FOX50 [WWW]. LaserComp Inc. Viitattu 11.06.2013. Saatavissa: <http://www.lasercomp.com/product/fox50.php>
- [23] Statistics Sheet for FOX304 [WWW]. LaserComp Inc. Viitattu 11.06.2013. Saatavissa: <http://www.lasercomp.com/product/fox304.php>
- [24] Testing Powders and Powder-Like Samples. 2008, LaserComp Inc. Julkaisematon selvitys. 1 s.
- [25] Tleoubaev, A., Brzezinski, A., Braga, L. C. Accurate Simultaneous Measurements of Thermal Conductivity and Specific Heat of Rubber, Elastomers, and Other Materials [verkkodokumentti]. s. 8–12. Viitattu 26.06.2013. Saatavissa: <http://www.lasercomp.com/Tech%20Papers/Papers/Accurate%20Simultaneous%20Measurements%20of%20Thermal%20Conductivity%20and%20Specific%20Heat.pdf>
- [26] Volumetric Specific Heat Calculation Using the FOX50 Heat Flow Meter Instruments. 2011, LaserComp Inc. Julkaisematon selvitys. 2 s.
- [27] Measurements of the Volumetric Specific Heat  $C_{pp}$  and Enthalpy of the Phase-Change Materials (PCM) Using the FOX Heat Flow Meter Instruments. 2007–2013, LaserComp Inc. Julkaisematon selvitys. 5 s.
- [28] SFS-EN 1015-11+A1 (2007). Muurauslaastien testimenetelmiä. Osa 11: Kovetuneen laastin taivutus- ja puristuslujuuden määrittäminen. = Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength
- [29] HygroLog HL-NT Data Sheet [verkkodokumentti]. Rotronic, 2010. 4 s. Viitattu 30.08.2013. Saatavissa: [http://www.rotronic-usa.com/ds/59010\\_E\\_HygroLogNT.pdf](http://www.rotronic-usa.com/ds/59010_E_HygroLogNT.pdf)

- [30] Pavlík Z., Pavlíková M., Volfová P., Kaulich V., Trník A., Ondruška J., Změškal O., Černý R. Properties of a New Type of Plaster Containing Phase-Change Material [WWW]. 2012 IACSIT Coimbatore Conferences, IPCSIT vol. 28 (2012) IACSIT Press, Singapore. 5 s. Viitattu 11.12.2013. Saatavissa: <http://www.ipcsit.com/vol28/023-CoimbatoreConferences-T001.pdf>
- [31] Thermal Conductivity of Some Common Materials and Gases [WWW]. The Engineering ToolBox. Viitattu 18.07.2013. Saatavissa: [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
- [32] Knauf. Esite 14, kipsilaastit [verkkodokumentti]. s. 4, 6, 10. Viitattu 28.06.2013. Saatavissa: [http://www.knauf.fi/sites/default/files/esite\\_manual\\_14\\_kipsilaastit.pdf](http://www.knauf.fi/sites/default/files/esite_manual_14_kipsilaastit.pdf)
- [33] Solids – Specific Heats [WWW]. The Engineering ToolBox. Viitattu 03.01.2014. Saatavissa: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)

## LIITTEET

LIITE 1	Laastien valmistustiedot, 1 s.
LIITE 2	Laastien lämmönjohtavuusmittausten menetelmän valinta, tulokset, 2 s.
LIITE 3	Laastien lämmönjohtavuusmittausten tulokset, 8 s.
LIITE 4	Laastien ominaislämpökapasiteettimittausten tulokset, 2 s.
LIITE 5	Betonimassan laboratoriotulosteet, 2 s.
LIITE 6	Betonien lämmönjohtavuusmittausten tulokset, 6 s.
LIITE 7	Betonien ominaislämpökapasiteettimittausten tulokset, 1 s.
LIITE 8	FOX304-mittausten tulokset, 2 s.

Laasti	Tyyppi	Valupäivä	Valmistajan suhdeohje	Valmistuserän määrä	Näytteen suhde
Kiilto 70	Lattiatasoite	-	8,00	-	-
Lattialämmitystasoite DF	Lattiatasoite	17.6.2013	5,41–6,06	0,57 kg + 1 dl	5,70
Multiplan	Lattiatasoite	13.6.2013	5,41–5,71	1,11 kg + 2 dl	5,55
Topplan	Lattiatasoite	13.6.2013	4,00	0,80 kg + 2 dl	4,00
Tasoflex	Lattiatasoite	17.6.2013	4,44	0,44 kg + 1 dl	4,40
Superfix DF	Kiinnityslaasti	-	2,31–2,73	-	-
Saneerauslaasti	Kiinnityslaasti	17.6.2013	3,33–3,64	0,348 kg + 1 dl	3,48
Lattialaasti DF	Kiinnityslaasti	13.6.2013	4,44–5,00	0,941 kg + 2 dl	4,71
Highflex S2	Kiinnityslaasti	13.6.2013	2,00–2,22	1,05 kg + 5 dl	2,10
Kiilto SR DF	Seinätasoite	17.6.2013	3,63–4,00	0,762 kg + 2 dl	3,81
Kiilto OT	Seinätasoite	20.6.2013	4,00–4,44	0,842 kg + 2 dl	4,21
Kiilto OTR	Seinätasoite	-	4,17–4,76	-	-
Kiilto OT Light	Seinätasoite	-	4,00–4,76	-	-
Kiilto KL	Seinätasoite	20.6.2013	4,17–4,76	0,667 kg + 1,5 dl	4,45
Kiilto TT	Seinätasoite	20.6.2013	4,44–5,00	0,941 kg + 2 dl	4,71
Kiilto Saumalaasti no. 39	Seinätasoite	20.6.2013	3,13–3,33	0,645 kg + 2 dl	3,23
EPS-pitoinen laasti	Muu	-	-	-	-
PCM-laasti	Muu	3.7.2013	-	-	-

Aineet punnittiin vaa’alla (kuva L1.1), jonka mittaustarkkuus on 0,1 grammaa, ja laastit sekoitettiin laboratoriosekoittimessa (kuva L1.2). Laastit, joille ei ole merkitty valupäivää, ovat Petteri Huttusen ja Marko Kiilin sekoittamia. PCM-massa toimitettiin valmiina.



**Kuva L1.1.** Vaaka Sartorius IC 34000 P.



**Kuva L1.2.** Sekoitin, öljyastia ja muotti.

## KIILTO SUPERFIX DF

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH °C	Kalibrointit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus			%	-kumul.vaik.
				ylä	ala		ka	ylä	ala		
Ei mitään	Superfix_p1+o1_3	58,6	22,7		20,0	0,0	19,46	0,4353	0,4570	4,86 %	-
	Superfix_p2+o2_1	58,6	22,4		20,0	0,0	19,23	0,4521	0,4621	3,28 %	-
	Superfix_p3+o3_1	58,7	22,5		20,0	0,0	18,19	0,4120	0,4547	9,86 %	-
	Superfix_p1+o1_3	58,6	22,7		20,0	0,0	8,81	0,4227	0,4312	1,99 %	-
	Superfix_p2+o2_2	58,6	22,4		20,0	0,0	8,76	0,4135	0,4243	2,58 %	-
Two-th.	Superfix_p3+o3_2	58,7	22,5		20,0	0,0	8,66	0,4162	0,4140	0,53 %	-
	Superfix_p1+o1_3	-	-		20,0	0,0	-	0,4466	0,4811	7,44 %	-
	Superfix_p2+o2_3	-	-		20,0	0,0	-	0,4899	0,5099	3,99 %	-
	Superfix_p3+o3_3	-	-		20,0	0,0	-	0,4082	0,4993	20,08 %	-
	Superfix_p1_kl	58,6	22,8		20,0	0,0	20,95	0,4274	0,4375	4,76 %	<b>0,4627</b>
Kumi	Superfix_p2_kl	59,9	22,7		20,0	0,0	20,78	0,4361	0,4277	0,4445	<b>0,4742</b>
	Superfix_p3_kl	59,2	22,6		20,0	0,0	19,79	0,4188	0,4006	0,4370	<b>0,4542</b>
	Superfix_o1_kl	58,6	22,8		20,0	0,0	10,31	0,3912	0,3869	0,3955	<b>0,4548</b>
	Superfix_o2_kl	58,6	22,8		20,0	0,0	10,31	0,3858	0,3813	0,3903	<b>0,4463</b>
	Superfix_o3_kl	59,2	22,6		20,0	0,0	10,26	0,3864	0,3877	0,3850	<b>0,4476</b>
Termol.	Superfix_p1+o1_t1	58,6	22,9		22/19,1	-2/1,6	19,86	<b>0,4498</b>	0,4415	0,4582	3,71 %
	Superfix_p2+o2_t1	58,6	22,9		22/20,9	-2/-0,2	19,13	<b>0,4717</b>	0,4544	0,4890	7,33 %
	Superfix_p3+o3_t1	58,9	23,0		22/19,1	-2/0,3	18,34	<b>0,4638</b>	0,4377	0,4898	11,23 %
	Superfix_p1o1_t22	61,9	22,8		22/20,6	-2/0,8	8,94	<b>0,4351</b>	0,4288	0,4413	2,89 %
	Superfix_p2+o2_t2	58,6	22,9		22/20,4	-2/0,0	9,07	<b>0,4203</b>	0,4123	0,4284	3,84 %
tl two-th.	Superfix_p3+o3_t2	58,9	23,0		22/20,0	-2/-0,1	8,84	<b>0,4362</b>	0,4339	0,4386	1,08 %
	Superfix_p1o1_t23	-	-		22/20,59	-2/0,81	-	<b>0,4403</b>	0,4345	0,4461	2,64 %
	Superfix_p2+o2_t3	-	-		22/20,45	-2/0,01	-	<b>0,5683</b>	0,5358	0,6008	11,45 %
	Superfix_p3+o3_t3	-	-		22/20,00	-2/-0,09	-	<b>0,4339</b>	0,3889	0,4788	20,73 %
	Superf_p1+o1_kt1	59,0	22,8		22/19,4	-2/0,8	19,83	0,4948	0,4889	0,5007	2,39 %
kl+tl	Superf_p2+o2_kt1	59,0	22,8		22/19,2	-2/0,2	20,73	0,5364	0,5466	0,5263	3,77 %
	Superf_p3+o3_kt1	58,0	23,0		22/19,8	-2/1,5	19,61	0,5159	0,4975	0,5343	7,14 %
	Superf_p1+o1_kt2	59,0	22,8		22/19,7	-2/0,7	10,46	0,4672	0,4770	0,4574	4,20 %
	Superf_p2+o2_kt2	59,0	22,8		22/18,3	-2/2,2	10,41	0,5411	0,5366	0,5456	1,66 %
	Superf_p3+o3_kt2	58,0	23,0		22/18,9	-2/0,5	10,34	0,4663	0,4678	0,4647	0,68 %

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

KIILTO OT LIGHT

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibroitint.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				%	-kumul.vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala			
Ei mitään	OT light p1+o1	57,9	23,4	Pyrex	20,0	0,0	14,43		<b>0,2843</b>	0,2929	0,2757	6,05 %	-
	OT li p2+o2 emtn_1	58,6	21,4	Vespel	20,0	0,0	19,35		<b>0,2838</b>	0,2758	0,2918	5,65 %	-
	OT light p3+o3_1	58,7	22,7	Vespel	20,0	0,0	19,46		<b>0,2917</b>	0,2875	0,2960	2,91 %	-
	OT light p1+o1_2	57,9	23,4	Pyrex	20,0	0,0	8,41		<b>0,1781</b>	0,1731	0,1830	5,56 %	-
	OT li p2+o2 emtn_2	58,6	21,4	Vespel	20,0	0,0	9,12		<b>0,2100</b>	0,2038	0,2162	5,91 %	-
	OT light p3+o3_2	58,7	22,8	Vespel	20,0	0,0	9,17		<b>0,2104</b>	0,2047	0,2162	5,46 %	-
Two-th.	OT light_p1+o1_3	-	-	Pyrex	20,0	0,0	-		<b>4,7660</b>	8,5910	0,9405	160,53 %	-
	OT li p2+o2 emtn_3	-	-	Vespel	20,0	0,0	-		<b>0,4133</b>	0,4023	0,4241	5,21 %	-
	OT light_p3+o3_3	-	-	Vespel	20,0	0,0	-		<b>0,4449</b>	0,4491	0,4407	1,89 %	-
Kumi	OT light_p1_etl	57,0	23,0	Pyrex	20,0	0,0	15,8		0,3209	0,3350	0,3067	8,83 %	<b>0,3381</b>
	OT light_p2_etl	58,0	23,6	Vespel	20,0	0,0	20,52		0,3386	0,3410	0,3361	1,47 %	<b>0,3545</b>
	OT light_p3_etl	58,2	23,6	Vespel	20,0	0,0	21,11		0,3312	0,3302	0,3323	0,62 %	<b>0,3453</b>
	OT light_o1_etl	58,7	22,8	Vespel	20,0	0,0	9,17		0,2304	0,2233	0,2375	6,17 %	<b>0,2330</b>
	OT light_o2_etl	58,6	22,8	Vespel	20,0	0,0	9,98		0,2788	0,2762	0,2814	1,87 %	<b>0,2937</b>
	OT light_o3_etl	58,7	22,8	Vespel	20,0	0,0	10,44		0,2670	0,2617	0,2723	3,98 %	<b>0,2777</b>
Termol.	OT light_p1_tl	58,4	23,0	Vespel	18,2	2,7	14,91		<b>0,3036</b>	0,3145	0,2926	7,22 %	-
	OT light_p2_tl	58,3	23,0	Vespel	18,2	1,1	19,46		<b>0,2992</b>	0,2896	0,3087	6,37 %	-
	OT light_p3_tl	58,4	23,0	Vespel	18,4	1,8	20,07		<b>0,3349</b>	0,3332	0,3366	1,00 %	-
	OT light_o1_tl	58,6	21,8	Vespel	18,5	1,7	8,48		<b>0,2472</b>	0,2482	0,2462	0,79 %	-
	OT light_o2_tl	58,7	22,0	Vespel	16,5	3,5	9,12		<b>0,2799</b>	0,2739	0,2859	4,29 %	-
	OT light_o3_tl	58,8	21,9	Vespel	17,1	2,4	9,02		<b>0,2432</b>	0,2335	0,2528	7,91 %	-
tl two-th.	OT li_p2+o2_tI3	-	-	Vespel	20/16,85	0/0,33	-		<b>0,4469</b>	0,4257	0,4681	9,49 %	-
	OT li_p3+o3_tI3	-	-	Vespel	22/18,34	-2/-0,27	-		<b>0,4635</b>	0,4531	0,4738	4,46 %	-
kl+tl	OT light_p1_k+tl	58,8	21,8	Vespel	25/21,8	-5/-1,6	15,82		0,4015	0,4190	0,3841	8,65 %	<b>0,4417</b>
	OT li p2+o2 ktl_1	58,6	21,4	Vespel	20/18,9	0/2,3	20,55		0,3810	0,3812	0,3809	0,07 %	<b>0,4056</b>
	OT li_p3+o3_kt	58,8	21,4	Vespel	22/20,2	-2/0,3	21,16		0,3869	0,3865	0,3868	0,21 %	<b>0,4120</b>
	OT li_p1+o1_kt2	59,0	21,6	Vespel	20/15,7	0/4,0	9,32		0,3515	0,3485	0,3544	1,66 %	<b>0,4001</b>
	OT li p2+o2 ktl_2	58,6	21,4	Vespel	20/17,9	0/3,5	10,24		0,3586	0,3533	0,3640	2,98 %	<b>0,4049</b>
	OT li_p3+o3_kt2	58,7	21,8	Vespel	22/20,4	-2/0,2	10,64		0,3499	0,3458	0,3540	2,35 %	<b>0,3899</b>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

LATTIATASOITTEET (1/2)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH	°C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus ka ylä ala	%	-kumul.vaik.
<b>Kiilto 70</b>									
kl+tl	70_p1_kltl3	60,1	22,9	Pyrex	22/18,3	22,68	1,299	1,251	7,34 %
	70_p2_kltl	60,0	23,8	Pyrex	22/18,1	22,89	1,314	1,236	11,93 %
	70_p3_kltl2	51,9	22,3	Pyrex	23/19,3	22,73	1,212	1,296	13,85 %
	70_o1_kltl2	51,9	22,3	Pyrex	23/18,7	11,46	0,9877	1,009	4,39 %
	70_o2_kltl2	60,0	22,8	Pyrex	24/17,7	11,35	1,025	1,059	6,57 %
	70_o3_kltl2	60,0	22,8	Pyrex	26/18,2	11,02	1,028	1,062	6,61 %
<b>Lattialämmitystasote DF</b>									
kl+tl	lämmitys_p1_kltl	52,1	22,0	Pyrex	23/20,0	17,88	0,9146	0,9229	1,81 %
	lämmitys_p2_kltl	58,5	22,0	Pyrex	23/19,7	19,02	0,9544	0,9657	2,37 %
	lämmitys_p3_kltl	58,5	22,0	Pyrex	23/18,4	17,09	1,008	1,023	2,86 %
	lämmitys_o1_kltl	52,1	22,0	Pyrex	23/18,5	7,65	0,6828	0,7098	7,92 %
	lämmitys_o2_kltl	58,5	22,0	Pyrex	23/13,2	8,13	0,7067	0,6670	11,24 %
	lämmitys_o3_kltl	52,1	22,0	Pyrex	25/20,3	9,07	0,7952	0,8050	2,49 %
<b>Multiplan</b>									
kl+tl	multi_p1_kltl	59,0	22,0	Pyrex	22/19,2	22,56	0,9870	1,013	5,25 %
	multi_p2_kltl	59,0	22,0	Pyrex	22/18,8	22,30	0,9980	0,9972	0,14 %
	multi_p3_kltl	59,0	22,0	Pyrex	22/19,3	22,02	0,9607	0,9602	0,09 %
	multi_o1_kltl	59,0	22,0	Pyrex	22/17,6	11,05	0,8988	0,8944	0,98 %
	multi_o2_kltl	59,0	22,0	Pyrex	22/17,2	11,71	0,7570	0,7715	3,82 %
	multi_o3_kltl	51,9	22,3	Pyrex	23/18,9	11,35	0,7588	0,7894	8,06 %

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.



LATTIATASOITTEET (2/2)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH	°C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus			%	-kumul.vaik.	
Topplan												
k+l+tl	topplan_p1_ktli	50,4	22,4	Pyrex	23/20,7	-3/0,4	20,29	0,7500	0,7603	0,7397	2,74 %	<u>0,9389</u>
	topplan_p2_ktli	50,4	22,4	Pyrex	23/20,7	-3/0,4	20,12	0,7450	0,7447	0,7453	0,08 %	<u>0,9326</u>
	topplan_p3_ktli	50,4	22,4	Pyrex	23/20,7	-3/0,4	19,91	0,7229	0,7096	0,7363	3,69 %	<u>0,8979</u>
	topplan_o1_ktli	59,0	22,0	Pyrex	22/18,1	-2/2,0	9,86	0,6904	0,6948	0,6861	1,26 %	<u>1,1561</u>
	topplan_o2_ktli	59,0	22,0	Pyrex	22/18,3	-2/2,1	11,05	0,7126	0,7332	0,6920	5,77 %	<u>1,1292</u>
	topplan_o3_ktli	59,0	22,0	Pyrex	24/19,7	-4/0,7	10,74	0,7055	0,7298	0,6812	6,88 %	<u>1,1305</u>
Tasoflex												
k+l+tl	tasoflex_p1_ktli	60,0	22,0	Pyrex	23/19,3	-3/0,0	19,02	0,7931	0,7645	0,8218	7,23 %	<u>1,0345</u>
	tasoflex_p2_ktli	60,0	22,0	Pyrex	23/19,7	-3/0,4	16,03	0,8121	0,8017	0,8224	2,56 %	<u>1,1451</u>
	tasoflex_p3_ktli	60,0	22,0	Pyrex	23/19,4	-3/0,4	18,75	0,8582	0,8386	0,8797	5,00 %	<u>1,1658</u>
	tasoflex_o1_ktli	60,0	22,0	Pyrex	20/13,5	0/3,4	7,59	0,6699	0,6555	0,6843	4,30 %	<u>1,4258</u>
	tasoflex_o2_ktli	60,0	22,0	Pyrex	21/15,9	-1/2,6	7,75	0,5960	0,5804	0,6116	5,24 %	<u>1,0492</u>
	tasoflex_o3_ktli	60,0	22,0	Pyrex	21/16,7	-1/2,9	7,11	0,5756	0,5687	0,5825	2,41 %	<u>1,0573</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

KIINNITYSLAASTIT (1/2)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH °C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus			ala	%	-kumul.vaik.	
Superfix DF												
k+l+t	Superf_p1+o1_kt1	59,0	22,8	Vespel	22/19,4	-2/0,8	19,83	0,4948	0,4889	0,5007	2,39 %	<u>0.5542</u>
	Superf_p2+o2_kt1	59,0	22,8	Vespel	22/19,2	-2/0,2	20,73	0,5364	0,5466	0,5263	3,77 %	<u>0.6079</u>
	Superf_p3+o3_kt1	58,0	23,0	Vespel	22/19,8	-2/1,5	19,61	0,5159	0,4975	0,5343	7,14 %	<u>0.5841</u>
	Superf_p1+o1_kt2	59,0	22,8	Vespel	22/19,7	-2/0,7	10,46	0,4672	0,4770	0,4574	4,20 %	<u>0.5825</u>
	Superf_p2+o2_kt2	59,0	22,8	Vespel	22/18,3	-2/2,2	10,41	0,5411	0,5366	0,5456	1,66 %	<u>0.7295</u>
	Superf_p3+o3_kt2	58,0	23,0	Vespel	22/18,9	-2/0,5	10,34	0,4663	0,4678	0,4647	0,68 %	<u>0.5829</u>
Saneerauslaasti												
k+l+t	saneeraus_p1_kltl	59,0	22,0	Vespel	23/20,9	-3/-0,5	22,83	0,7388	0,7581	0,7194	5,23 %	<u>0.8938</u>
	saneeraus_p2_kltl	59,0	22,0	Pyrex	23/20,6	-3/1,7	23,11	0,7414	0,7720	0,7107	8,27 %	<u>0.8955</u>
	saneeraus_p3_kltl	59,0	22,0	Pyrex	23/18,6	-3/0,5	22,10	0,7261	0,7329	0,7194	1,87 %	<u>0.8804</u>
	saneeraus_o1_kltl	59,0	22,0	Pyrex	20/17,4	0/2,7	11,05	0,6104	0,6295	0,5914	6,24 %	<u>0.8629</u>
	saneeraus_o2_kltl	59,0	22,0	Pyrex	20/16,2	0/3,1	10,67	0,6224	0,6251	0,6196	0,89 %	<u>0.9075</u>
	saneeraus_o3_kltl	59,0	22,0	Pyrex	20/17,0	0/3,1	10,80	0,6461	0,6579	0,6343	3,66 %	<u>0.9614</u>
Lattialaasti DF												
k+l+t	lattial_p1_kltl	59,0	22,0	Pyrex	24/21,6	-4/-1,6	21,29	0,6004	0,6221	0,5786	7,25 %	<u>0.6959</u>
	lattial_p2_kltl	59,0	22,0	Pyrex	23/21,1	-3/-0,6	22,10	0,5750	0,5917	0,5583	5,81 %	<u>0.6557</u>
	lattial_p3_kltl	59,0	22,0	Pyrex	23/21,0	-3/-0,4	22,43	0,6045	0,6147	0,5943	3,38 %	<u>0.6957</u>
	lattial_o1_kltl	50,4	22,4	Pyrex	23/19,8	-3/1,7	10,44	0,5619	0,5712	0,5526	3,32 %	<u>0.7740</u>
	lattial_o2_kltl	50,4	22,4	Pyrex	23/19,9	-3/1,5	10,08	0,5552	0,5751	0,5354	7,14 %	<u>0.7711</u>
	lattial_o3_kltl	50,4	22,4	Pyrex	23/19,9	-3/0,0	10,80	0,5540	0,5680	0,5401	5,03 %	<u>0.7459</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalewjen lämmönjohtavuusarvot.

KIINNITYSLAASTIT (2/2)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH	°C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus			%	-kumul.vaik.	
Highflex S2												
k/+-tl	highflex_p1_kltl	53,0	21,0	Pyrex	23/21,5	-3/-0,1	21,43	0,4322	0,4312	0,4332	0,47 %	<u>0,4679</u>
	highflex_p2_kltl	53,0	21,0	Vespel	23/20,6	-3/0,5	21,10	0,4055	0,4099	0,4010	2,19 %	<u>0,4350</u>
	highflex_p3_kltl	53,0	21,0	Vespel	23/20,4	-3/-0,8	22,55	0,4096	0,4156	0,4036	2,93 %	<u>0,4379</u>
	highflex_o1_kltl	53,0	21,0	Vespel	21/19,0	-1/2,2	9,90	0,3861	0,3902	0,3820	2,10 %	<u>0,4502</u>
	highflex_o2_kltl	53,0	21,0	Vespel	23/20,7	-3/0,5	10,25	0,3750	0,3781	0,3720	1,64 %	<u>0,4299</u>
(Rikkinäinen kpl)												
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

SEINÄTASOITTEET (1/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH	°C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus			ala	%	-kumul.vaik.
Kiilto SR DF												
k +tl	srdf_p1_kitl	59,6	21,7	Vespel	23/20,6	-3/-0,9	22,09	0,4299	0,4280	0,4317	0,86 %	<u>0,4638</u>
	srdf_p2_kitl	59,6	21,7	Vespel	23/21,2	-3/0,6	20,06	0,4013	0,4005	0,4022	0,40 %	<u>0,4315</u>
	srdf_p3_kitl	59,6	21,7	Vespel	23/21,4	-3/-0,8	21,96	0,4137	0,4236	0,4037	4,81 %	<u>0,4438</u>
	srdf_o1_kitl	59,6	21,7	Vespel	23/20,0	-3/0,0	8,60	0,3437	0,3392	0,3483	2,63 %	<u>0,3932</u>
	srdf_o2_kitl	59,6	21,7	Vespel	23/20,4	-3/0,6	9,03	0,3465	0,3429	0,3501	2,07 %	<u>0,3944</u>
	srdf_o3_kitl	59,6	21,7	Vespel	23/20,3	-3/0,4	10,07	0,3066	0,3095	0,3037	1,88 %	<u>0,3309</u>
Kiilto OT												
k +tl	OT_p1_kitl	59,5	22,0	Pyrex	23/20,3	-3/0,0	23,19	0,8176	0,7934	0,8417	5,92 %	<u>1,0174</u>
	OT_p2_kitl	59,5	22,0	Pyrex	23/19,2	-3/0,0	22,96	0,8474	0,8435	0,8513	0,91 %	<u>1,0705</u>
	OT_p3_kitl	59,5	22,0	Pyrex	23/20,0	-3/-0,5	23,49	0,8406	0,8586	0,8227	4,27 %	<u>1,0523</u>
	OT_o1_kitl	59,0	22,4	Pyrex	23/17,7	-3/1,8	10,80	0,7198	0,6992	0,7403	5,70 %	<u>1,1694</u>
	OT_o2_kitl	59,0	22,4	Pyrex	23/19,4	-3/0,6	12,34	0,7442	0,7691	0,7194	6,67 %	<u>1,1373</u>
	OT_o3_kitl	59,0	22,4	Pyrex	23/18,9	-3/1,0	11,68	0,7646	0,7958	0,7335	8,15 %	<u>1,2381</u>
Kiilto OTR												
k +tl	otr_p1_kitl	59,7	23,8	Pyrex	22/20	-2/0,2	21,26	0,6344	0,6144	0,6544	6,31 %	<u>0,7461</u>
	otr_p2_kitl	59,7	23,8	Pyrex	22/19,6	-2/0,6	21,34	0,6586	0,6489	0,6684	2,97 %	<u>0,7820</u>
	otr_p3_kitl	59,7	23,8	Pyrex	22/19,6	-2/0,7	21,56	0,6224	0,6179	0,6270	1,46 %	<u>0,7264</u>
	otr_o1_kitl	60,7	23,5	Pyrex	22/18,5	-2/1,6	10,80	0,5446	0,5406	0,5487	1,49 %	<u>0,7262</u>
	otr_o2_kitl	60,7	23,5	Pyrex	22/18,2	-2/2,5	10,49	0,6018	0,5966	0,6069	1,72 %	<u>0,8648</u>
	otr_o3_kitl	60,7	23,5	Pyrex	22/15,0	-2/1,9	8,91	0,5601	0,5729	0,5473	4,57 %	<u>0,8350</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

SEINÄTASOITTEET (2/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH	°C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus ka ylä ala	%	-kumul.vaik.			
Kiilto OT Light												
k+l+tl	OT light_p1_k+tl	58,8	21,8	Vespel	25/21,8	-5/-1,6	15,82	0,4015	0,4190	0,3841	8,65 %	<u>0.4417</u>
	OT li p2+o2 ktl_1	58,6	21,4	Vespel	20/18,9	0/2,3	20,55	0,3810	0,3812	0,3809	0,07 %	<u>0.4056</u>
	OT li_p3+o3_kt	58,8	21,4	Vespel	22/20,2	-2/0,3	21,16	0,3869	0,3865	0,3868	0,21 %	<u>0.4120</u>
	OT li_p1+o1_kt2	59,0	21,6	Vespel	20/15,7	0/4,0	9,32	0,3515	0,3485	0,3544	1,66 %	<u>0.4001</u>
	OT li p2+o2 ktl_2	58,6	21,4	Vespel	20/17,9	0/3,5	10,24	0,3586	0,3533	0,3640	2,98 %	<u>0.4049</u>
	OT li_p3+o3_kt2	58,7	21,8	Vespel	22/20,4	-2/0,2	10,64	0,3499	0,3458	0,3540	2,35 %	<u>0.3899</u>
Kiilto KL												
k+l+tl	KL_p1_kitl	59,4	21,4	Pyrex	23/21,2	-3/0,7	21,43	0,5264	0,5381	0,5147	4,44 %	<u>0.5914</u>
	KL_p2_kitl	59,4	21,4	Vespel	23/18,8	-3/-0,2	20,64	0,5442	0,5058	0,5826	14,11 %	<u>0.6191</u>
	KL_p3_kitl	59,4	21,4	Vespel	23/21,1	-3/-0,1	21,43	0,5385	0,5454	0,5317	2,55 %	<u>0.6079</u>
	kl_o1_kitl	57,4	22,4	Vespel	23/16,3	-3/1,0	9,46	0,4148	0,4057	0,4239	4,40 %	<u>0.5034</u>
	kl_o2_kitl	57,4	22,4	Vespel	23/19,6	-3/1,8	9,46	0,4615	0,4517	0,4713	4,26 %	<u>0.5901</u>
	KL_o3_kitl	59,4	21,4	Vespel	23/18,6	-3/1,4	10,23	0,5256	0,5127	0,5385	4,91 %	<u>0.7017</u>
Kiilto TT												
k+l+tl	tt_p1_kitl	59,8	21,2	Vespel	23/21,5	-3/-0,8	21,01	0,4870	0,4895	0,4846	1,01 %	<u>0.5398</u>
	tt_p2_kitl	59,8	21,2	Vespel	23/20,6	-3/0,6	21,41	0,5263	0,5248	0,5277	0,55 %	<u>0.5913</u>
	tt_p3_kitl	59,8	21,2	Vespel	23/21,4	-3/0	20,24	0,4787	0,4768	0,4805	0,78 %	<u>0.5312</u>
	tt_o1_kitl	59,8	21,2	Vespel	20/16,9	0/3	8,59	0,4820	0,4802	0,4838	0,75 %	<u>0.6562</u>
	tt_o2_kitl	59,8	21,2	Vespel	25/21,5	-5/-0,6	7,99	0,4080	0,4085	0,4075	0,23 %	<u>0.5156</u>
	tt_o3_kitl	59,8	21,2	Vespel	25/19,2	-5/0,7	7,89	0,4897	0,4998	0,4795	4,15 %	<u>0.7030</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

SEINÄTASOITTEET (3/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH °C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus			%	-kumul.vaik.		
Kiilto Saumalaasti no. 39												
k/+-tl	39_p1_kltl	60,0	21,0	Pyrex	23/20,9	-3/0,3	21,96	0,7005	0,7344	0,6666	9,69 %	<u>0,8415</u>
	39_p2_kltl	60,0	21,0	Pyrex	23/20,8	-3/-0,1	23,39	0,7290	0,7785	0,6795	13,57 %	<u>0,8739</u>
	39_p3_kltl	60,0	21,0	Pyrex	23/20,2	-3/-0,3	23,42	0,7508	0,8053	0,6964	14,49 %	<u>0,9075</u>
	39_o1_kltl	60,0	21,0	Vespe	23/19,5	-3/1,0	10,25	0,6092	0,6160	0,6023	2,25 %	<u>0,8940</u>
	39_o2_kltl	57,4	22,4	Vespe	23/19,6	-3/1,8	11,13	0,6453	0,6508	0,6399	1,70 %	<u>0,9435</u>
	39_o3_kltl	60,0	21,0	Pyrex	24/18,2	-4/0,7	10,02	0,6706	0,6804	0,6607	2,95 %	<u>1,0793</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

MUUT

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot % RH	°C	Kalibrointit.	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus			%	-kumul.vaik.
							ka	ylä	ala		
EPS-laasti											
k/+tl	eps_p1_kitl	59,5	22,5	Perspex	23/22,3	-3/-1,2	21,41	0,1673	0,1638	0,1708	4,14 %
	eps_p2_kitl	59,5	22,5	Perspex	21/20,5	-1/0,1	20,62	0,1673	0,1681	0,1666	0,90 %
	eps_p3_kitl	59,5	22,5	Perspex	21/20,6	-1/0,3	20,60	0,1594	0,1578	0,1609	1,92 %
	eps_o1_kitl	59,5	22,5	Perspex	21/19,3	-1/1,6	9,07	0,1743	0,1743	0,1743	0,04 %
	eps_o2_kitl	59,5	22,5	Perspex	21/19,5	-1/1,7	8,59	0,1564	0,1563	0,1565	0,12 %
	eps_o3_kitl	59,5	22,5	Perspex	21/19,7	-1/1,0	7,77	0,1654	0,1660	0,1647	0,82 %
PCM-laasti											
k/+tl	pcm_p1_kitl	59,0	22,4	Vespel	23/21,8	-3/-0,9	22,16	0,3437	0,3391	0,3483	2,68 %
	pcm_p2_kitl	59,0	22,4	Vespel	23/21,7	-3/-0,6	22,22	0,3293	0,3217	0,3369	4,63 %
	pcm_p3_kitl	59,0	22,4	Vespel	23/21,9	-3/-0,2	21,73	0,3197	0,3120	0,3274	4,80 %
	pcm_o1_kitl	59,0	22,4	Vespel	23/20,4	-3/-0,2	11,52	0,3161	0,3177	0,3145	1,02 %
	pcm_o2_kitl	58,4	22,4	Vespel	23/20,1	-3/0,1	10,66	0,3286	0,3210	0,3361	4,60 %
	pcm_o3_kitl	58,4	22,4	Vespel	23/20,9	-3/-0,4	10,89	0,3164	0,3136	0,3192	1,75 %

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

## LAASTIEN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTIMITTAUKSET

Materiaali	Tiedoston nimi	pvm.	Ominaislämpökapasiteetti $c_p$ [J/(m <sup>3</sup> ·K)]			
			10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Kiilto 70	70_p2_pid	08.08.	1 875 343	1 786 596	1 869 038	2 132 477
	70_p3_pid	07.08.	1 885 287	1 964 176	2 012 721	2 077 873
			<b>1 880 315</b>	<b>1 875 386</b>	<b>1 940 880</b>	<b>2 105 175</b>
Lattialämmitys-tasoite DF	lämmitys_om	21.08.	1 888 226	1 954 917	2 064 345	2 106 800
	lämmitys3_om_emtn	04.09.	2 028 897	1 945 112	1 848 826	1 950 279
			<b>1 958 562</b>	<b>1 950 015</b>	<b>1 956 586</b>	<b>2 028 540</b>
Multiplan	multiplan_om	23.08.	2 044 317	2 036 092	1 962 136	2 113 907
	multiplan1	28.10.	1 967 809	1 980 936	2 050 870	2 011 269
			<b>2 006 063</b>	<b>2 008 514</b>	<b>2 006 503</b>	<b>2 062 588</b>
Topplan	topplan_om	20.08.	1 859 973	1 963 117	1 967 918	2 027 384
	topplan2_om_kl	02.09.	1 864 207	1 847 072	<del>2 309 090</del>	<del>1 411 975</del>
	30/40: topplanp2_3040	14.11.			1 945 026	1 844 091
			<b>1 862 090</b>	<b>1 905 095</b>	<b>1 956 472</b>	<b>1 935 738</b>
Tasoflex	tasoflex_om	22.08.	1 965 946	2 030 300	1 996 611	2 098 018
	tasofp3_om	16.09.	2 089 600	2 057 432	2 088 943	2 149 124
			<b>2 027 773</b>	<b>2 043 866</b>	<b>2 042 777</b>	<b>2 123 571</b>
Superfix DF	superfp3_om_emtn	16.09.	1 427 156	1 417 322	1 446 117	1 464 156
	superfix_om	13.08.	1 284 660	1 258 931	<del>1 830 671</del>	1 307 657
	30: superfix_30_om	14.08.			1 389 204	
			<b>1 355 908</b>	<b>1 338 127</b>	<b>1 417 661</b>	<b>1 385 907</b>
Saneerauslaasti	saneep3_om_emtn	18.09.	1 675 807	1 649 829	1 730 990	2 239 846
	saneerausp1_emtn	25.11.	1 503 137	1 715 805	1 695 219	1 769 137
			<b>1 589 472</b>	<b>1 682 817</b>	<b>1 713 105</b>	<b>2 004 492</b>
Lattialaasti DF	lattialaasti_om	26.08.	1 597 007	1 601 695	1 737 152	1 849 293
	lattialaap1	22.10.	1 543 911	1 632 197	1 763 727	1 723 416
			<b>1 570 459</b>	<b>1 616 946</b>	<b>1 750 440</b>	<b>1 786 355</b>
Highflex S2	highfp3_om_emtn	30.09.	1 335 474	1 451 470	1 348 688	<del>1 039 966</del>
	highfp1_om_emtn	25.10.	1 340 732	1 498 101	1 488 905	<del>664 930</del>
	40: highfp1_40_em	01.11.				1 506 700
	40: highfp3_40_em	05.11.				1 513 653
			<b>1 338 103</b>	<b>1 474 786</b>	<b>1 418 797</b>	<b>1 510 177</b>
Kiilto SR DF	srdf_p1	13.08.	1 219 254	1 392 111	1 297 059	1 370 957
	srdf_p2	13.08.	1 197 749	1 341 700	1 372 420	1 324 403
			<b>1 208 502</b>	<b>1 366 906</b>	<b>1 334 740</b>	<b>1 347 680</b>
Kiilto OT	ot_p1	11.08.	1 337 674	1 332 418	1 476 120	1 566 382
	ot_p2	11.08.	1 528 722	1 514 225	1 569 654	1 544 674
			<b>1 433 198</b>	<b>1 423 322</b>	<b>1 522 887</b>	<b>1 555 528</b>
Kiilto OTR	otr_p2	12.08.	1 217 671	1 243 400	1 194 325	1 256 354
	otr_p3	12.08.	1 102 114	1 309 313	1 336 250	1 375 104
			<b>1 159 893</b>	<b>1 276 357</b>	<b>1 265 288</b>	<b>1 315 729</b>
Kiilto OT Light	OTlight_p1	07.08.	841 968	920 892	981 672	1 094 131
	OTlight_p3	06.08.	979 917	958 992	962 781	1 001 840
			<b>910 943</b>	<b>939 942</b>	<b>972 227</b>	<b>1 047 986</b>
Kiilto KL	kl_p2	15.08.	1 037 463	1 204 899	1 236 576	1 275 176
	kl_p3	15.08.	1 038 087	1 075 723	1 074 812	1 134 869
			<b>1 037 775</b>	<b>1 140 311</b>	<b>1 155 694</b>	<b>1 205 023</b>



Kiilto TT	tt_p1	14.08.	1 107 851	1 010 775	1 080 961	1 017 133
	tt_p2	14.08.	972 662	1 030 986	1 041 057	1 083 558
			<b>1 040 257</b>	<b>1 020 881</b>	<b>1 061 009</b>	<b>1 050 346</b>
Kiilto Sauma-laasti no. 39	39_om	15.08.	1 918 090	1 897 445	1 932 510	1 917 131
	39p2_om_etmn	02.10.	1 822 469	1 752 058	1 856 689	1 894 392
			<b>1 870 280</b>	<b>1 824 752</b>	<b>1 894 600</b>	<b>1 905 762</b>
EPS-laasti	EPS1_pid	04.08.	641 756	483 111	517 571	577 810
	EPS2_pid	05.08.	495 876	484 672	465 306	534 129
	EPS3_pid	06.08.	452 088	513 660	508 403	393 900
			<b>529 907</b>	<b>493 814</b>	<b>497 093</b>	<b>501 946</b>
PCM-laasti	pcm_p1	18.08.	1 220 816	2 032 457	1 151 507	1 141 198
	pcm_p2	19.08.	1 294 648	2 031 581	1 127 868	1 138 775
	pcm_p3	18.08.	1 131 665	1 959 828	1 050 622	1 120 787
			<b>1 215 710</b>	<b>2 007 955</b>	<b>1 109 999</b>	<b>1 133 587</b>

## PCM-LAASTIN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTI MITTAUKSET 2 °C VÄLEIN

Koekappale	Tiedoston nimi	pvm.	Ominaislämpökapasiteetti $c_p$ [J/(m <sup>3</sup> ·K)]			
PCM p <sub>3</sub>	pcm_p3_2ast	20.08.	10 °C	1 043 621	22 °C	3 204 385
	pcm_p3_2ast10	21.08.	12 °C	1 245 381	24 °C	1 205 913
			14 °C	1 301 206	26 °C	1 098 060
			16 °C	1 854 188	28 °C	1 100 010
			18 °C	1 863 056	30 °C	1 053 966
			20 °C	2 409 366		

Laboratoriotuloste  
Kuormakirja: 29193

10.6.2010

**Reseptin tiedot**

Koodi	35021	Kloridipitoisuusluokka	Cl 0,10
Suhteitusryhmä	NORMA	Suojahuokossuhde	0,00
Lujuusluokka	25	Vesi-sementtisuhde	0,00
Notkeusluokka	S3		
Raekoko	16		
Huomautuksia			
Rasitusluokat	[X0:50,100,-] [XC1:50,100,-] [XC2:50,-,-] [XC3:50,-,-]		

**Kuormakirjan tiedot**

Vastuuosasto		Mylläri	Vaherto
Projekti/Viite	20098	Sekoitin	1
Asiakasnumero	26794	Valmistus alkoi	10.6.2010 13:24:16
Asiakas	LUJABETONI OY	Valmistus päättyi	10.6.2010 13:24:16
Toimitusosoite	KESKIRUSKONKATU 11	Kuorman koko	
Suunniteltu käyttöikä	50	Tavoite	1,00m³
Rasitusluokat	XC1	Toteutunut	0,98m³

**Komponentit**

Komponentti	CEM I 42,5 R/2	TUHKKA	0-8	0-8/6	3-8
Tavoite	250,00kg	65,00kg	520,00kg	520,00kg	176,75kg
Toteutunut	249,10kg	69,30kg	503,00kg	524,00kg	186,00kg
Virhe	-0,90kg/-0,36%	4,30kg/6,62%	-17,00kg/-3,27%	4,00kg/0,77%	9,25kg/5,23%
Lämpötila	10,00°C	10,00°C	17,00°C	16,00°C	18,00°C
Kosteus-%			4,00%	4,00%	1,00%
Absorptio-%			1,00%	1,00%	1,00%
Aktiivisuuskerroin	0,95	0,95			
Komponentti	6-16	fill	Kylmä vesi	sikament cvo	
Tavoite	404,00kg	213,20kg	128,05kg	1,89kg	
Toteutunut	394,00kg	200,00kg	128,30kg	2,19kg	
Virhe	-10,00kg/-2,48%	-13,20kg/-6,19%	0,25kg/0,20%	0,30kg/15,87%	
Lämpötila	16,00°C	17,00°C	10,00°C	15,00°C	
Kosteus-%	1,00%	4,00%			
Absorptio-%	1,00%	1,00%			

**Yhteenvedo (yhdelle kuutiolle betonia)**

<b>Vesimäärä</b>		<b>Sementtimäärä</b>		<b>Vesi-sementtisuhde (w/c)</b>	
Tavoite	195,00kg	Tavoite	315,00kg	Tavoite	0,62
Toteutunut	185,48kg	Toteutunut	325,86kg	Toteutunut	0,57
Tavoite tehollinen	177,38kg	Tavoite EN206-1	299,25kg	Tavoite EN206-1	0,59
Toteutunut tehollinen	167,17kg	Toteutunut EN206-1	309,57kg	Toteutunut EN206-1	0,54
		<b>Sementtiseosainemäärä</b>		<b>Vesi/(sementti + k x seosaine)-suhde</b>	
		Tavoite EN206-1	299,25kg	Tavoite EN206-1	0,59
		Toteutunut EN206-1	309,57kg	Toteutunut EN206-1	0,54
Kiviaineksen tilavuusosuus	67,91%				
Kiviaineksen massaosuus	77,75%				

**Laboratoriotuloste**  
Kuormakirja: 29140

9.6.2010

**Reseptin tiedot**

Koodi	35028	Kloridipitoisuusluokka	Cl 0,10
Suhteitusryhmä	NORMA	Suojahuokossuhde	0,00
Lujuusluokka	40	Vesi-sementtisuhde	0,00
Notkeusluokka	S3		
Raekoko	16		
Huomautuksia			
Rasitusluokat	[XC1:50,100,-] [XC2:50,100,-] [XC3:50,100,-] [XC4:50,100,-] [X0:50,100,-]		

**Kuormakirjan tiedot**

Vastuuosasto		Myläri	Vaherto
Projekti/Viite	27626/HÄRMÄLÄNOJA	Sekoitin	1
Asiakasnumero	1459	Valmistus alkoi	9.6.2010 14:49:19
Asiakas	YIT-RAKENNUS INFRAPALVELUT	Valmistus päättyi	9.6.2010 14:49:19
Toimitusosoite	ILMAILUNKATU/PIRKKALA	Kuorman koko	
Suunniteltu käyttöikä	50	Tavoite	2,00m³
Rasitusluokat	XC2	Toteutunut	2,00m³

**Komponentit**

Komponentti	CEM I 42,5 R	TUHKA	0-8	0-8/6	3-8
Tavoite	726,00kg	204,00kg	745,20kg	745,20kg	238,36kg
Toteutunut	721,60kg	204,10kg	805,00kg	734,00kg	238,00kg
Virhe	-4,40kg/-0,61%	0,10kg/0,05%	59,80kg/8,02%	-11,20kg/-1,50%	-0,36kg/-0,15%
Lämpötila	10,00°C	10,00°C	17,00°C	16,00°C	18,00°C
Kosteus-%			3,50%	3,50%	1,00%
Absorptio-%			1,00%	1,00%	1,00%
Aktiivisuuskertoimen	1,10	0,95			
Komponentti	6-16	fill	Kylmä vesi	sikament evo	
Tavoite	1111,00kg	436,80kg	326,44kg	4,65kg	
Toteutunut	1114,00kg	437,00kg	326,30kg	4,59kg	
Virhe	3,00kg/0,27%	0,20kg/0,05%	-0,14kg/-0,04%	-0,06kg/-1,29%	
Lämpötila	16,00°C	17,00°C	10,00°C	15,00°C	
Kosteus-%	1,00%	4,00%			
Absorptio-%	1,00%	1,00%			

**Yhteenvedo (yhdele kuutiolle betonia)**

Vesimäärä		Sementtimäärä		Vesi-sementtisuhde (w/c)	
Tavoite	210,00kg	Tavoite	465,00kg	Tavoite	0,45
Toteutunut	204,19kg	Toteutunut	462,68kg	Toteutunut	0,44
Tavoite tehollinen	194,18kg	Tavoite EN206-1	496,20kg	Tavoite EN206-1	0,39
Toteutunut tehollinen	187,73kg	Toteutunut EN206-1	493,65kg	Toteutunut EN206-1	0,38
		Sementtiseosainemäärä		Vesi/(sementti + k x seosaine)-suhde	
		Tavoite EN206-1	496,20kg	Tavoite EN206-1	0,39
		Toteutunut EN206-1	493,65kg	Toteutunut EN206-1	0,38
Kiviaineksen tilavuusosuus	61,34%				
Kiviaineksen massaosuus	70,80%				
Betonipasta	386,63l/m³				
Suhteellinen kutistuma	0,620mm/m³				

BETONIKOEKAPPALEET  
Lujuus: C20/25 (1/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibrointit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				-kumul.vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala	%	
Ei mitään	bet1.1_emtn	53,2	20,7	Pyrex	20,0	0,0	9,63	<u>1,141</u>	1,102	1,180	6,81 %	-
	bet1.2_emtn	55,3	20,7	Pyrex	20,0	0,0	10,11	<u>0,3438</u>	0,3229	0,3647	12,14 %	-
	<del>bet1.3_emtn</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet1.4_emtn	55,1	20,8	Pyrex	20,0	0,0	10,06	<u>0,4804</u>	0,4385	0,5222	17,42 %	-
	bet2.1_emtn	53,2	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,55	<u>0,6423</u>	0,6691	0,6156	8,32 %	-
	bet2.2_emtn	55,3	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,73	<u>0,7218</u>	0,7539	0,6897	8,89 %	-
	bet2.3_emtn	52,6	20,9	Pyrex	20,0	0,0	21,11	<u>0,8029</u>	0,8083	0,7975	1,34 %	-
	bet2.4_emtn	55,1	20,8	Pyrex	20,0	0,0	20,55	<u>0,6570</u>	0,7438	0,5701	26,43 %	-
	bet3.1_emtn	54,7	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,47	<u>0,7368</u>	0,8002	0,6734	17,22 %	-
	<del>bet3.2_emtn</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet3.3_emtn	54,7	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,35	<u>0,8061</u>	0,8375	0,7748	7,78 %	-
	bet3.4_emtn	54,7	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,93	<u>0,7735</u>	0,9269	0,6200	39,68 %	-
Two-th.	bet1.1+2.1_tt	55,3	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>0,4650</u>	0,4970	0,4331	13,74 %	-
	bet1.2+2.2_tt	55,3	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>0,8877</u>	-2,7900	4,5610	827,48 %	-
	bet1.1+2.3_tt	52,6	20,9	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>0,6624</u>	0,6857	0,6390	7,04 %	-
	bet1.4+2.4_tt	55,1	20,8	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>1,433</u>	2,240	0,6255	112,69 %	-
	bet1.1+3.1_tt	54,7	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>0,5908</u>	0,6778	0,5037	29,48 %	-
	<del>bet1.2+3.2_tt</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet1.2+3.3_tt	54,7	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>-3,040</u>	-1,420	-4,660	106,43 %	-
	bet1.4+3.4_tt	54,7	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<u>-8,330</u>	-17,40	0,7531	218,09 %	-

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alälämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

BETONIKOEKAPPALEET  
Lujuus: C20/25 (2/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibrintit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				-kumul.vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala	%	
Kumi	bet1.1_kl	52,6	20,9	Pyrex	20,0	0,0	11,10	0,7547	0,7380	0,7714	4,43 %	<u>1,254</u>
	bet1.2_kl	52,4	20,9	Pyrex	20,0	0,0	11,28	0,5190	0,4838	0,5543	13,59 %	<u>0,6646</u>
	<del>bet1.3_kl</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet1.4_kl	52,4	20,9	Pyrex	20,0	0,0	11,25	0,5331	0,5024	0,5639	11,53 %	<u>0,6924</u>
	bet2.1_kl	51,8	20,7	Pyrex	20,0	0,0	21,87	0,7104	0,7278	0,6931	4,88 %	<u>0,8577</u>
	bet2.2_kl	52,3	21,1	Pyrex	20,0	0,0	21,92	0,8657	0,9118	0,8196	10,65 %	<u>1,118</u>
	bet2.3_kl	52,3	21,1	Pyrex	20,0	0,0	22,50	0,8957	0,9301	0,8614	7,67 %	<u>1,162</u>
	bet2.4_kl	55,1	20,8	Pyrex	20,0	0,0	21,74	0,6977	0,7947	0,6006	27,82 %	<u>0,8390</u>
	bet3.1_kl	52,6	20,9	Pyrex	20,0	0,0	21,89	0,7255	0,7619	0,6890	10,04 %	<u>0,8813</u>
	<del>bet3.2_kl</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet3.3_kl	52,6	20,9	Pyrex	20,0	0,0	21,72	0,8383	0,8837	0,7929	10,82 %	<u>1,072</u>
Termol.	bet3.4_kl	52,6	20,9	Pyrex	20,0	0,0	22,23	0,8157	0,9517	0,6797	33,34 %	<u>1,026</u>
	bet1.1_2_tl	51,8	20,7	Pyrex	25/18,9	-5/3,4	10,01	<u>0,9406</u>	0,9169	0,9643	5,04 %	-
	bet1.2_tl	52,4	20,9	Pyrex	25/20,0	-5/3,0	10,21	<u>0,5368</u>	0,5105	0,5631	9,81 %	-
	<del>bet1.3_tl</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet1.4_tl	52,4	20,9	Pyrex	25/18,5	-5/1,6	10,08	<u>0,6121</u>	0,5783	0,6459	11,04 %	-
	bet2.1_tl	51,8	20,7	Pyrex	25/21,2	-5/3,5	20,68	<u>0,9224</u>	0,9434	0,9014	4,55 %	-
	bet2.2_tl	51,8	20,7	Pyrex	25/19,9	-5/-0,1	20,70	<u>0,9178</u>	0,9753	0,8602	12,54 %	-
	bet2.3_tl	50,5	20,9	Pyrex	25/18,9	-5/-1,5	21,16	<u>1,010</u>	1,017	1,003	1,46 %	-
	bet2.4_tl	51,8	20,7	Pyrex	25/20,1	-5/0,1	20,65	<u>0,7967</u>	0,8673	0,7260	17,73 %	-
	bet3.1_tl	52,4	20,9	Pyrex	23/18,8	-3/2,3	20,88	<u>0,8318</u>	0,8866	0,7770	13,19 %	-
	<del>bet3.2_tl</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet3.3_tl	52,4	20,9	Pyrex	25/20,9	-5/2,1	20,75	<u>0,9407</u>	0,9699	0,9114	6,22 %	-
	bet3.4_tl	52,4	20,9	Pyrex	25/19,8	-5/2,8	21,29	<u>1,060</u>	1,190	0,9299	24,56 %	-

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

BETONIKOEKAPPALEET  
Lujuus: C20/25 (3/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibrointit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				-kumul.vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala	%	
tl two-th	bet1.1+2.1_tltt	51,8	20,7	Pyrex	-	-	-	<u>1,192</u>	1,289	1,094	16,30 %	-
	bet1.2+2.2_tltt	51,8	20,7	Pyrex	-	-	-	<u>-5,410</u>	-14,00	3,210	318,65 %	-
	bet1.1+2.3_tltt	50,5	20,9	Pyrex	-	-	-	<u>2,715</u>	2,859	2,570	10,63 %	-
	bet1.4+2.4_tltt	51,8	20,7	Pyrex	-	-	-	<u>2,334</u>	3,442	1,226	94,96 %	-
	bet1.1+3.1_tltt	52,4	20,9	Pyrex	-	-	-	<u>1,406</u>	1,688	1,124	40,12 %	-
	<del>bet1.2+3.2_tt</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet1.2+3.3_tltt	52,4	20,9	Pyrex	-	-	-	<u>-6,840</u>	-17,80	4,143	321,18 %	-
	bet1.4+3.4_tltt	52,4	20,9	Pyrex	-	-	-	<u>15,41</u>	29,26	1,552	179,85 %	-
kl+tl	bet1.1_tkl/2	50,5	20,7	Pyrex	25/18,9	-5/2,3	11,30	1,259	1,236	1,283	3,71 %	<u>5,182</u>
	bet1.2_tkl	50,5	21,1	Pyrex	25/16,2	-5/0,5	11,23	0,9123	0,8680	0,9566	9,71 %	<u>1,856</u>
	<del>bet1.3_ttkl</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet1.4_tkl	50,5	21,1	Pyrex	25/18,4	-5/-0,1	11,13	0,7394	0,7014	0,7774	10,29 %	<u>1,204</u>
	bet2.1_tkl	50,5	20,9	Pyrex	25/20,2	-5/1,0	21,79	1,074	1,121	1,026	8,91 %	<u>1,534</u>
	bet2.2_tkl	50,5	20,9	Pyrex	25/19,5	-5/0,5	21,87	1,224	1,299	1,150	12,17 %	<u>1,886</u>
	bet2.3_tkl	50,5	20,9	Pyrex	25/21,0	-5/0,1	22,50	1,179	1,225	1,133	7,85 %	<u>1,747</u>
	bet2.4_tkl	50,5	21,1	Pyrex	25/21,3	-5/1,5	22,00	1,005	1,125	0,8843	23,96 %	<u>1,382</u>
	bet3.1_tkl	50,5	21,1	Pyrex	25/20,3	-5/1,3	21,92	1,148	1,205	1,090	10,01 %	<u>1,697</u>
	<del>bet3.2_ttkl</del>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bet3.3_tkl	50,5	21,1	Pyrex	25/18,9	-5/0,6	21,84	1,381	1,427	1,336	6,59 %	<u>2,327</u>
	bet3.4_tkl	50,5	21,1	Pyrex	25/19,5	-5/2,1	22,38	1,320	1,506	1,133	28,24 %	<u>2,112</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

BETONIKOEKAPPALEET  
Lujuus: C32/40 (1/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibrointit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				-kumul.vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala	%	
Ei mitään	bet1x1_emtn	50,5	20,7	Pyrex	20,0	0,0	9,60	<b>0,718</b>	0,744	0,692	7,22 %	-
	bet1x2_emtn	50,5	20,7	Pyrex	20,0	0,0	9,96	<b>0,5902</b>	0,5711	0,6094	6,49 %	-
	bet1x3_emtn	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	9,91	0,5035	0,5379	0,4692	13,64 %	-
	bet1x4_emtn	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	9,27	<b>0,4113</b>	0,3795	0,4430	15,45 %	-
	bet2x1_emtn	50,5	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,60	<b>0,7489</b>	0,8075	0,6903	15,66 %	-
	bet2x2_emtn	50,5	20,7	Pyrex	20,0	0,0	20,85	<b>0,6011</b>	0,6253	0,5768	8,07 %	-
	bet2x3_emtn	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	21,16	<b>0,6493</b>	0,7468	0,5518	30,02 %	-
	bet2x4_emtn	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	20,55	<b>0,5962</b>	0,6243	0,5681	9,43 %	-
	bet3x1_emtn	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	20,90	<b>0,6669</b>	0,7764	0,5573	32,85 %	-
	bet3x2_emtn	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	20,88	0,5425	0,6428	0,4422	36,96 %	-
	bet3x3_emtn	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	20,65	<b>0,9870</b>	1,1110	0,8631	25,10 %	-
	bet3x4_emtn	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	20,83	<b>0,8363</b>	0,9484	0,7241	26,82 %	-
	bet1x1+2x1_tt	50,5	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>0,7806</b>	0,8726	0,6887	23,56 %	-
	bet1x2+2x2_tt	50,5	20,7	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>0,6174</b>	0,6848	0,5500	21,83 %	-
Two-th.	bet1x3+2x3_tt	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>0,8938</b>	1,1350	0,6530	53,87 %	-
	bet1x4+2x4_tt	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>1,036</b>	1,331	0,7403	57,03 %	-
	bet1x1+3x1_tt	47,9	21,0	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>0,6251</b>	0,7797	0,4705	49,46 %	-
	bet1x2+3x2_tt	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	-	0,5475	0,7396	0,3554	70,16 %	-
	bet1x3+3x3_tt	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>19,760</b>	35,520	4,002	159,50 %	-
	bet1x4+3x4_tt	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	-	<b>-2,850</b>	7,36	1,6680	317,15 %	-

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtelevyjen lämmönjohtavuusarvot.

**BETONIKOEKAPPALEET**  
**Lujuus: C32/40 (2/3)**

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibrointit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				%	-kumul. vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala			
Kumi	bet1x1_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	11,02	0,6357	0,6617	0,6197	8,18 %	<u>0,925</u>	
	bet1x2_kl	47,4	21,2	Pyrex	20,0	0,0	11,13	0,5266	0,5307	0,5225	1,54 %	<u>0,6823</u>	
	bet1x3_kl	47,4	21,2	Pyrex	20,0	0,0	11,20	0,5520	0,5725	0,5280	8,08 %	<u>0,7313</u>	
	bet1x4_kl	47,4	21,2	Pyrex	20,0	0,0	10,49	0,5356	0,4896	0,5816	17,17 %	<u>0,7157</u>	
	bet2x1_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	21,79	0,7958	0,8700	0,7217	18,64 %	<u>0,9977</u>	
	bet2x2_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	22,15	0,6903	0,7114	0,6692	6,11 %	<u>0,824</u>	
	bet2x3_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	22,33	0,8362	0,9236	0,7488	20,90 %	<u>1,060</u>	
	bet2x4_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	21,92	0,6426	0,6671	0,6180	7,63 %	<u>0,7540</u>	
	bet3x1_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	22,10	0,7690	0,8449	0,6930	19,75 %	<u>0,9494</u>	
	bet3x2_kl	47,4	21,2	Pyrex	20,0	0,0	22,12	0,5968	0,6822	0,5113	28,64 %	<u>0,6863</u>	
	bet3x3_kl	48,5	21,2	Pyrex	20,0	0,0	22,07	0,9317	0,9963	0,8671	13,87 %	<u>1,237</u>	
	bet3x4_kl	47,7	21,0	Pyrex	20,0	0,0	22,33	0,8621	0,9421	0,7821	18,56 %	<u>1,105</u>	
Termol.	bet1x1_tl2	51,0	19,9	Pyrex	25/19,3	-5/2,2	9,98	<u>0,7370</u>	0,7565	0,7175	5,30 %	-	
	bet1x2_tl	47,4	21,2	Pyrex	25/18,7	-5/3,3	9,75	<u>0,8873</u>	0,8952	0,8794	1,78 %	-	
	bet1x3_tl	46,1	20,2	Pyrex	25/20,6	-5/2,2	10,19	0,7046	0,7481	0,6611	12,35 %	-	
	bet1x4_tl	46,1	20,2	Pyrex	25/19,5	-5/1,4	9,45	<u>0,5698</u>	0,5545	0,5851	5,36 %	-	
	bet2x1_tl	54,1	20,0	Pyrex	25/19,5	-5/0,2	20,93	<u>0,8707</u>	0,9577	0,7837	19,97 %	-	
	bet2x2_tl	54,1	20,0	Pyrex	25/20,0	-5/-0,6	20,83	<u>0,8359</u>	0,8768	0,7950	9,78 %	-	
	bet2x3_tl	46,1	20,2	Pyrex	25/20,4	-5/0,6	21,11	<u>0,900</u>	1,032	0,769	29,20 %	-	
	bet2x4_tl	51,0	19,9	Pyrex	25/20,0	-5/0,4	20,47	<u>0,8509</u>	0,8773	0,8246	6,20 %	-	
	bet3x1_tl	51,0	19,9	Pyrex	25/20,0	-5/1,5	21,16	<u>0,8193</u>	0,9133	0,7253	22,95 %	-	
	bet3x2_tl	47,4	21,2	Pyrex	25/21,7	-5/5,4	21,01	0,9869	1,1420	0,7713	38,78 %	-	
	bet3x3_tl	51,0	19,9	Pyrex	25/19,9	-5/-0,8	21,11	<u>0,9424</u>	1,0160	0,8689	15,61 %	-	
	bet3x4_tl	46,1	20,2	Pyrex	25/20,4	-5/-0,2	21,06	<u>1,011</u>	1,139	0,8835	25,26 %	-	

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtlevien lämmönjohtavuusarvot.



BETONIKOEKAPPALEET  
Lujuus: C32/40 (3/3)

	Tiedoston nimi	Lähtöarvot		Kalibrointit.	Lämpötila		mm	Lämmönjohtavuus				-kumul.vaik.
		% RH	°C		ylä	ala		ka	ylä	ala	%	
tl two-th	bet1x1+2x1_tlft	54,1	20,0	Pyrex	-	-	-	<u>1,618</u>	2,036	1,200	51,62 %	-
	bet1x2+2x2_tlft	54,1	20,0	Pyrex	-	-	-	<u>1,367</u>	1,55	1,181	27,34 %	-
	bet1x3+2x3_tlft	46,1	20,2	Pyrex	-	-	-	<u>1,538</u>	2,004	1,073	60,53 %	-
	bet1x4+2x4_tlft	51,0	19,9	Pyrex	-	-	-	<u>2,462</u>	3,364	1,559	73,33 %	-
	bet1x1+3x1_tlft	51,0	19,9	Pyrex	-	-	-	<u>1,096</u>	1,344	0,847	45,34 %	-
	bet1x2+3x2_tlft	47,4	21,2	Pyrex	-	-	-	1,2490	1,7330	0,7645	77,54 %	-
	bet1x3+3x3_tlft	51,0	19,9	Pyrex	-	-	-	<u>82,390</u>	143,40	21,370	148,12 %	-
	bet1x4+3x4_tlft	47,4	21,2	Pyrex	-	-	-	<u>-5,63</u>	-13,70	2,444	286,88 %	-
	bet1x1_kltl	47,8	19,5	Pyrex	25/18,4	-5/0,1	11,13	0,994	1,032	0,957	7,58 %	<u>2,336</u>
	bet1x2_kltl	47,8	19,5	Pyrex	25/18,2	-5/0,8	11,18	0,9528	0,9634	0,9422	2,22 %	<u>2,075</u>
kl+tl	bet1x3_kltl	47,8	19,5	Pyrex	25/18,1	-5/0,5	11,25	0,8750	0,9232	0,8267	11,04 %	<u>1,683</u>
	bet1x4_kltl	47,8	19,5	Pyrex	25/16,7	-5/-0,5	10,49	0,8810	0,8334	0,9286	10,81 %	<u>1,857</u>
	bet2x1_kltl	47,8	19,5	Pyrex	25/18,2	-5/0,4	21,89	1,207	1,301	1,112	15,62 %	<u>1,842</u>
	bet2x2_kltl	47,8	19,5	Pyrex	25/18,6	-5/0,3	22,28	0,997	1,014	0,980	3,44 %	<u>1,360</u>
	bet2x3_kltl	47,8	19,4	Pyrex	25/19,3	-5/-0,4	22,40	1,195	1,325	1,064	21,84 %	<u>1,790</u>
	bet2x4_kltl	49,5	19,9	Pyrex	25/19,0	-5/2,7	21,69	1,067	1,122	1,0120	10,34 %	<u>1,522</u>
	bet3x1_kltl	49,5	19,9	Pyrex	25/18,4	-5/1,2	22,28	1,241	1,399	1,082	25,50 %	<u>1,909</u>
	bet3x2_kltl	49,5	19,9	Pyrex	25/19,9	-5/0,7	22,02	0,8874	1,0100	0,7645	27,70 %	<u>1,155</u>
	bet3x3_kltl	49,5	19,9	Pyrex	25/18,7	-5/0,1	22,23	1,417	1,526	1,307	15,41 %	<u>2,406</u>
	bet3x4_kltl	49,5	19,9	Pyrex	25/18,6	-5/0,5	22,33	1,241	1,360	1,221	19,16 %	<u>1,906</u>

\* Huom. Prosenttiero on laitteen laskema ja ottaa huomioon muutakin kuin pelkät ylä- ja alalämpövirtalevyjen lämmönjohtavuusarvot.

## BETONIKOEKAPPALEIDEN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETIT

	Kappale	Tiheys [kg/m³]	pvm. 2014	Ominaislämpökapasiteetti c <sub>p</sub> [J/(m³·K)]			
				10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Muutettu Gain Level -tasoa:							
C20/25	bet1.1	2257	11.02.	1 773 477	1 881 617	1 926 328	1 950 430
	bet2.1	2245	30.01.	1 532 254	1 561 237	2 743 716	2 028 535
	bet2.2	2208	28.01.	1 753 820	2 259 610	1 559 549	1 281 780
	bet2.3	2255	29.01.	1 792 722	1 845 443	2 643 633	2 280 087
C32/40	bet2x1	2245	17.01.	1 881 251	2 666 757	2 828 694	1 430 292
	bet2x3	2244	09.01.	1 807 043	2 537 350	2 272 262	1 970 935
	bet3x1	2240	15.01.	1 535 323	1 923 741	1 995 329	2 418 569
	bet3x4	2247	16.01.	1 813 174	1 532 740	2 754 517	2 157 853
Muutettu PID-kertoimia:							
C20/25	bet1.1	2257	29.07.	1 742 209	1 901 270	1 938 467	1 851 256
	bet2.1	2245	28.07.	1 556 888	1 563 258	1 615 691	1 683 811
	bet2.2	2208	28.07.	1 635 733	1 713 181	1 796 527	1 785 523
	bet2.3	2255	29.07.	1 696 602	1 798 179	1 833 635	1 895 605
C32/40	bet2x1	2245	01.08.	1 882 129	1 834 018	1 926 520	1 911 697
	bet2x3	2244	31.07.	1 680 972	1 850 551	1 812 202	1 910 467
	bet3x1	2240	30.07.	1 573 890	1 714 783	1 796 645	1 807 185
	bet3x4	2247	30.07.	1 683 914	1 783 642	1 858 638	1 931 028

## FOX304-MITTAUKSET (1/2)

	Menet.	Lähtöarvot % RH	°C	Lämpötila ylä ala	mm	Lämmönjohtavuus ka ylä ala	%	sign.vika, kpl
Kiilto 70	ei mitään	60,0	21,0	20,0	0,0	0,6247	0,6155	2,97 %
	kup.+IRMM	55,5	23,1	20,0	0,0	0,7112	0,7271	4,48 %
	kuparip.	60,4	21,4	20,0	0,0	0,6842	0,6938	2,82 %
Lattialämmitystasote DF	ei mitään	60,1	22,0	20,0	0,0	0,5830	0,5817	0,41 %
	kup.+IRMM	54,5	23,1	20,0	0,0	0,6652	0,6801	4,48 %
	kuparip.	59,9	22,3	20,0	0,0	0,6430	0,6526	2,97 %
Multiplan	ei mitään	60,0	22,4	20,0	0,0	0,5867	0,5961	3,21 %
	kup.+IRMM	54,7	23,0	20,0	0,0	0,6115	0,6311	6,44 %
	kuparip.	59,5	22,5	20,0	0,0	0,5605	0,5742	4,88 %
Topplan	ei mitään	59,9	22,3	20,0	0,0	0,4110	0,4121	0,55 %
	kup.+IRMM	54,5	23,1	20,0	0,0	0,4387	0,4417	1,37 %
	kuparip.	60,0	22,4	20,0	0,0	0,3666	0,3662	0,23 %
Taseflex	-	-	-	-	-	-	-	-
Superfix DF	ei mitään	59,5	21,2	20,0	0,0	0,3366	0,3408	2,50 %
	kup.+IRMM	54,1	22,3	20,0	0,0	0,3928	0,4132	10,37 %
	kuparip.	58,7	21,0	20,0	0,0	0,4013	0,4115	5,10 %
Saneerauslaasti	-	-	-	-	-	-	-	-
Lattialaasti DF	ei mitään	57,0	22,7	20,0	0,0	0,3985	0,3935	2,48 %
	kup.+IRMM	57,0	22,6	20,0	0,0	0,4344	0,4316	1,30 %
	kuparip.	53,8	21,2	20,0	0,0	0,4311	0,4245	3,08 %
Highflex S2	ei mitään	58,4	22,4	20,0	0,0	0,3576	0,3577	0,02 %
	kup.+IRMM	55,5	23,0	20,0	0,0	0,3836	0,3810	1,38 %
	kuparip.	57,0	22,4	20,0	0,0	0,3680	0,3647	1,79 %
Kiilto SR DF	ei mitään	60,6	21,7	20,0	0,0	0,3145	0,3312	10,65 %
	kup.+IRMM	54,0	21,4	20,0	0,0	0,3514	0,3786	15,48 %
	kuparip.	60,1	22,0	20,0	0,0	0,3295	0,3497	12,30 %
Kiilto-OT	-	-	-	-	-	-	-	-

**FOX304-MITTAUKSET (2/2)**

[illegible]